

Redes Inalámbricas de Sensores con características de tiempo real como herramienta para la Monitorización de Constantes Vitales, en el Marco del Proyecto MERIS



Tesis de Maestría

Ing. Carolina Ríos Fuentes

Director: Magíster. Ing. Héctor Fabio Jaramillo O.

Universidad del Cauca
Instituto de Postgrados de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones IPET
Maestría en Ingeniería área Telemática
Servicios Avanzados de Telecomunicaciones
Popayán, Octubre de 2009

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	1
Capítulo 1 Redes inalámbricas de sensores	3
1.1 Generalidades	3
1.2 Arquitecturas para WSN	4
1.2.1 Rango geográfico de cobertura	5
1.3 Protocolo de Comunicaciones	6
1.3.1 Tipos de Dispositivos	8
1.3.2 Topologías de Red	8
1.3.3 Estructura de Trama MAC	9
1.4 Sistemas operativos para WSN	11
1.4.1 <i>TinyOS</i>	12
1.5 Limitaciones de las WSN	14
1.6 Aplicaciones de las WSN	15
1.7 Resumen	15
Capítulo 2 WSN desde la perspectiva médica	17
2.1 Signos vitales	17
2.2 Sistemas de monitorización de signos vitales con WSN	19
2.2.1 <i>CodeBlue</i>	20
2.2.2 Advanced Health and Disaster Aid Network: AID-N	21
2.3 Particularidades del escenario médico	23
2.4 Situaciones médicas críticas en una emergencia	23
2.5 WSN MERIS	24
2.6 Resumen	29
Capítulo 3 Caracterización de MERIS como un Sistema de Tiempo Real	31
3.1 Generalidades de los sistemas de tiempo real	31
3.2 Proyectos relacionados	32
3.2.1 Implicit EDF: An Implicit Prioritized Access Protocol for WSN	33
3.2.2 RAP: A Real-Time Communication Architecture for Large-Scale Wireless Sensor Networks	33
3.2.3 SPEED: A real-time routing protocol for sensor networks.	34
3.2.4 MMSPEED: Multipath Multi-SPEED protocol for QoS guarantee of reliability and Timeliness in wireless sensor networks	35
3.2.5 RPAR: Real-time Power-Aware Routing in Sensor Networks	35
3.2.6 A Real-Time Communication Framework for Wireless Sensor-Actuator Networks	36
3.2.7 PA-EDF: Power Aware EDF, Real-time Support for Wireless Sensor Networks	36
3.2.8 Otros antecedentes	37
3.3 Arquitectura de comunicación para MERIS	38
3.3.1 Estructuras de trama	40
3.3.2 Manejo de la información, extracción de características	41
3.3.3 Protocolo de iniciación, mantenimiento de la red y acceso al medio	41
3.3.4 Políticas de priorización en el envío de mensajes a la <i>Gateway</i>	43
3.3.5 Algoritmo de Enrutamiento	43
3.4 Modelado del sistema MERIS	44
3.4.1 Modelado Estación base	45
3.4.2 Modelado <i>Gateway</i>	49
3.4.3 Modelado Nodo	50
3.4.4 Diagrama de despliegue del sistema	52

3.5	Resumen	52
Capítulo 4	Prototipos desarrollados.....	54
4.1	Prototipo I: Adaptación del nodo CEI para el proyecto MERIS	54
4.1.1	Estudio de la Red Inalámbrica de Sensores del CEI	55
4.1.2	Métodos para medir los signos vitales FC y FR, y sus transductores.	60
4.1.3	Bloques de adaptación HW y SW	62
4.1.4	Diseño de las placas	67
4.2	Prototipo II: implementación de la arquitectura para aplicaciones RT	69
4.2.1	IRIS	69
4.2.2	Protocolos: Diseminación y Colección de <i>TinyOS</i>	70
4.2.3	Especificaciones temporales de la implementación.....	71
4.3	Resumen	72
Capítulo 5	Experimentación.....	74
5.1	Pruebas a la placa de sensado y procesamiento.....	74
5.1.1	Módulo FC.....	74
5.1.2	Módulo FR.....	75
5.1.3	Módulo calculo de FC y FR, y Clasificación.....	77
5.1.4	Consumo de potencia del sistema.	77
5.2	Pruebas a la WSN IRIS	78
5.2.1	Pruebas a la WSN con los protocolos Diseminación y Colección	78
5.2.2	Pruebas a la WSN con la implementación propuesta.....	87
5.3	Resumen	96
Capítulo 6	Conclusiones.....	98
REFERENCIAS	100

Lista de figuras

Fig. 1	Red Inalámbrica de sensores	3
Fig. 2	Arquitectura de rangos	5
Fig. 3	Topologías <i>ZigBee</i>	8
Fig. 4	Estructura de Trama MAC	10
Fig. 5	Mapa conceptual, capítulo 1.....	16
Fig. 6	(a) Mote EKG, (b) Mote pulsoxímetro.....	21
Fig. 7	Algunos de los sensores que Soporta <i>miTag</i>	22
Fig. 8	Escenario MERIS	27
Fig. 9	Mapa conceptual, capítulo II.....	30
Fig. 10	Diagrama de contexto del esquema de comunicación en RT para MERIS.....	39
Fig. 11	Estructuras de trama	40
Fig. 12	Partes de una supertrama	41
Fig. 13	Diagrama de funcionamiento protocolo diseminación	42
Fig. 14	Ejemplo del comportamiento de la WSN	43
Fig. 15	Diagrama de casos de uso para la estación base.....	45
Fig. 16	Configurar conexión.....	45
Fig. 17	Conectar a la <i>Gateway</i>	46
Fig. 18	Monitorear Signos vitales	46
Fig. 19	Monitorear signos vitales continuamente	47
Fig. 20	Guardar datos signos vitales	47
Fig. 21	Topología de red.....	48
Fig. 22	Información de red.....	48
Fig. 23	Trazas de mensajes	49
Fig. 24	Diagrama de casos de uso para la <i>Gateway</i>	49

Fig. 25 Diagrama de casos de uso nodo	50
Fig. 26 Diagrama de Despliegue del sistema	52
Fig. 27 Mapa conceptual capítulo III	53
Fig. 28 Nodo en capas propuesto por el CEI (mm)	55
Fig. 29 Arquitectura capa de procesamiento	56
Fig. 30 Esquema de la placa de expansión con sus conectores	57
Fig. 31 Dimensiones verticales del Nodo [mm]	57
Fig. 32 Dimensiones de los conectores [mm]	58
Fig. 33 Posición de los conectores en cada capa	58
Fig. 34 Esquema de Conectores	59
Fig. 35 a) Termistor Buconasal da <i>Biolink Sleep Support</i> , US\$ 290 y b) AC Pressure airflow sensor, US\$ 299.....	61
Fig. 36 Adult Finger Clip, US\$ 168.	62
Fig. 37 Diagrama de Solución para el nodo MERIS.....	62
Fig. 38 Diagrama en bloques del módulo FC	63
Fig. 39 Puntas de prueba	63
Fig. 40 Esquemático del módulo FR.....	64
Fig. 41 Analogía del vector de muestras con la señal sensada del termistor.....	65
Fig. 42 Algoritmo para la clasificación del paciente.....	66
Fig. 43 Interfaz gráfica del bloque despliegue	67
Fig. 44 <i>Layout</i> placa de sensado.....	68
Fig. 45 <i>Layout</i> placa de procesamiento.....	68
Fig. 46 (a) Nodo IRIS (b) <i>Gateway</i> MIB520.....	69
Fig. 47 Mapa conceptual capítulo IV	73
Fig. 48 (a) Puente H propuesto por TI (b) Puente H implementado	74
Fig. 49 Señales de salida de las puntas de prueba.....	75
Fig. 50 Valores del Vector de muestras para FR igual (a) 21 y (b) 17 RPM	75
Fig. 51 FR visualizada en la herramienta de depuración IAR Systems.....	76
Fig. 52 FR visualizada en la herramienta de depuración IAR Systems.....	76
Fig. 53 Montaje de etapa de prueba.....	77
Fig. 54 Valores de FR, FC, SaO2 y clasificación visualizados en la herramienta de depuración IAR Systems	77
Fig. 55 (a) Escenario 1 y (b) Escenario 2	78
Fig. 56 Escenario 3 (a) fase 1, (b) fase 2 (c) y fase 3.....	79
Fig. 57 Latencia del Nodo a diferentes frecuencias de Paquete.	80
Fig. 58 Porcentaje de paquetes cuya latencia fue menor que la frecuencia de envío.	80
Fig. 59 Fiabilidad en la transmisión a diferentes frecuencias de paquete	81
Fig. 60 Comportamiento del RSSI de los paquetes recibidos	81
Fig. 61 Porcentajes de paquetes con errores de secuencia.....	82
Fig. 62 Latencia promedio con 7 nodos.....	83
Fig. 63 Comportamiento de la latencia en función del número de nodos.....	83
Fig. 64 Fiabilidad en la comunicación de la Red	83
Fig. 65 Porcentaje de paquetes con pérdida de secuencia.....	84
Fig. 66 Fiabilidad en la comunicación en función de la distancia del nodo	84
Fig. 67 Grafico de fiabilidad de la red para segundo rango de cobertura.....	85
Fig. 68 Perdida de secuencia escenario 2.....	85
Fig. 69 Latencia para la red en un escenario multisalto	85
Fig. 70 Fiabilidad de la red en un escenario multisalto.....	86
Fig. 71 Pérdida de secuencia en un escenario multisalto.	86
Fig. 72 Representación gráfica de la transición del apagado del nodo 5	88
Fig. 73 Slots de tiempo asignados para 7 nodos.....	88

Fig. 74 Slots de tiempo asignados para 5 nodos.....	88
Fig. 75 Slots de tiempo asignados para 3 nodos.....	89
Fig. 76 Pasos efectuados en la prueba 2	89
Fig. 77 Ubicación inicial de los nodos.....	90
Fig. 78 Ubicación del nodo 3 cuando se desplazo a la derecha	90
Fig. 79 Ubicación del nodo 3 cuando se desplazo a la izquierda	90
Fig. 80 WSN con 7 nodos.....	91
Fig. 81 WSN con 5 nodos en el primer rango y 2 en el segundo	92
Fig. 82 ST asignados a cada nodo	92
Fig. 83 Recepción de mensajes del nodo 4.....	93
Fig. 84 Latencia promedio de la WSN según el número de nodos	94
Fig. 85 Comparación de latencias entre MERIS y Protocolo Diseminador/Colector	94
Fig. 86 Fiabilidad para cada uno de los nodos	95
Fig. 87 Mapa conceptual, capítulo V	97

Lista de tablas

Tabla 1 Valores normales de frecuencia cardiaca.....	17
Tabla 2 Valores normales de la frecuencia respiratoria	18
Tabla 3 Niveles de la frecuencia respiratoria.....	18
Tabla 4 Niveles normales de Temperatura según edad.....	18
Tabla 5 Presiones sanguíneas normales	19
Tabla 6 Consecuencias de un paro respiratorio a través del tiempo.....	23
Tabla 7 Código internacional de colores	25
Tabla 8 Extracción de características.....	41
Tabla 9 Ejemplo de una tabla de vecinos.....	44
Tabla 10 Caso de uso iniciar aplicación	45
Tabla 11 Caso de uso monitorizar pacientes	46
Tabla 12 Caso de uso edición información de pacientes	47
Tabla 13 Caso de uso monitorizar red.....	48
Tabla 14 Caso de uso sincronizar nodos	49
Tabla 15 Caso de uso enviar información	50
Tabla 16 Caso de uso evaluar estado de salud del paciente	51
Tabla 17 Caso de uso almacenar Información	51
Tabla 18 Caso de uso enviar información	51
Tabla 19 Consumo de cada capa del nodo CE	60
Tabla 20 Rangos de los Signos vitales.....	65
Tabla 21 Dimensiones en la placa de sensado	68
Tabla 22 Tiempo requerido para medir signos vitales.....	71
Tabla 23 Consumo de potencia de los módulos.....	78
Tabla 24 Comparación entre WSN con protocolos <i>TinyOS</i> y la propuesta	95

Introducción

La gestión de una catástrofe requiere acciones inmediatas, bien planificadas y que generalmente exceden de forma considerable la capacidad de respuesta tanto humana como económica de la comunidad afectada. Las estadísticas mundiales señalan que las personas que sufren traumas y no mueren de inmediato tienen grandes posibilidades de sobrevivir, aún cuando tengan lesiones muy graves, siempre y cuando reciban una pronta atención médica especializada. A este lapso crítico se ha denominado la "hora dorada del trauma"; pasado ese lapso, la mortalidad en las personas accidentadas crece rápidamente [1].

Durante una situación de emergencia es adecuado tener en cuenta tres aspectos que resultan fundamentales: primero, el tiempo de respuesta es muy crítico y se agudiza en relación directa al número de víctimas. Ocasionalmente en función de un accionar rápido, se suele sacrificar tanto la precisión en la toma de medidas como la eficacia en la prestación de los primeros auxilios por parte de personal calificado, en buena parte debido a tener que realizar de forma manual y recurrente, tareas tales como la toma de las constantes vitales y la verificación continua del estado de las víctimas potencialmente recuperables. Segundo, los recursos asistenciales, materiales y de personal médico especializado *in-situ* son escasos debido al carácter imprevisto de la mayoría de las catástrofes; y tercero, el margen de error, el cual puede producirse en la primera y/o sucesivas valoraciones de los heridos, dando lugar a fallas en la asignación y priorización de las víctimas, procedimientos de atención y remisión a los centros de salud. Por tanto, es pertinente la introducción de nuevos métodos y herramientas que faciliten y agilicen los procedimientos básicos de monitorización y evaluación continua del estado de salud de un grupo afectado por una catástrofe, para brindar una atención oportuna y gestionar de forma óptima los recursos disponibles.

El conjunto de necesidades expuesto, es el eje de trabajo del proyecto MERIS "Monitorización de Emergencia de víctimas de Catástrofes con Redes Inalámbricas de Sensores"¹ [2]. En el marco del proyecto se realizaron una serie de entrevistas a los diferentes organismos de socorro a nivel regional como la Cruz Roja Colombiana Seccional Cauca, Defensa Civil seccional Cauca y el Benemérito Cuerpo de Bomberos Voluntarios de Popayán donde se evidenció que estos no cuentan con herramientas de monitorización médica masiva, lo cual genera pérdida de eficiencia en la asignación de recursos humanos y técnicos durante la atención prehospitalaria².

Por tanto, el aporte principal de MERIS es el de diseñar una herramienta de monitoreo continuo de signos vitales para un grupo de pacientes, donde el uso de una Red Inalámbrica de Sensores (RIS o sus siglas en inglés WSN – *Wireless Sensor Network*) surge como alternativa tecnológica viable que permite al personal de emergencias acceder a información en tiempo real sobre el estado de salud de las víctimas recuperables.

¹ Proyecto conjunto del Grupo de Ingeniería Telemática de la Universidad del Cauca y el Centro de Electrónica Industrial de la Universidad Politécnica de Madrid, financiado a través de la VIII Convocatoria de ayudas y subvenciones de Cooperación y Solidaridad de la Universidad Politécnica de Madrid UPM

² Atención Prehospitalaria: Servicio operacional y de coordinación para los problemas médicos urgentes y que comprende todos los servicios de salvamento, atención médica y transporte que se presta a enfermos o accidentados fuera del hospital y que constituye una prolongación del tratamiento de urgencias hospitalarias.

En el marco de la cooperación generado por el proyecto MERIS, el Centro de Electrónica Industrial (CEI) de la Universidad Politécnica de Madrid aporta su plataforma hardware y su *know-how* en este campo, materializado a través de un prototipo de nodo para WSN, el cual está bajo un proceso de mejoramiento continuo desde hace 4 años [3]. Para marzo de 2008, el prototipo de nodo más avanzado disponible por el CEI está adaptado para medir temperatura y humedad de un material, por lo cual se hace evidente la necesidad de adaptación a nivel de sensado y procesamiento.

Además, la apropiación de la WSN del CEI como herramienta para la implementación de una solución acorde a los requerimientos del proyecto MERIS, debía tener en cuenta los inconvenientes inherentes a las WSN así como algunas consideraciones para el desarrollo de una aplicación en el área de la salud tales como:

- Los nodos son estacionarios pero pueden movilizarse, es decir, una vez desplegada la red sobre un terreno, se espera que el grado de movilidad de los nodos sea mínimo, pero cada despliegue afronta topologías y problemas distintos.
- La red operaría en ambientes hostiles y cambiantes con alcances variables, debido a que las catástrofes pueden ocurrir sobre terrenos de difícil acceso.
- La red debe brindar alta confiabilidad y disponibilidad, dado que el sistema trabaja directamente con personas en estado de salud crítico donde una falla en la red afectaría la atención oportuna del paciente al brindar al personal médico información imprecisa de su estado real de salud.

Por lo tanto, este trabajo de maestría propone el diseño de una placa de sensado compatible con el nodo CEI como herramienta para la monitorización de los signos vitales de un paciente y define una arquitectura de comunicación con características de tiempo real para MERIS, de forma que con esta caracterización el sistema incorpore condiciones de alta confiabilidad en su operación, con lo cual se espera un adecuado monitoreo de los pacientes facilitando la toma de decisiones oportunas frente a su estado de salud.

Este documento presenta en el capítulo I, los conceptos más importantes de las Redes inalámbricas de sensores; en el capítulo II los sistemas más representativos para la monitorización de constantes vitales que pudieran servir de referencia para la construcción de la solución, además de un análisis de requerimientos para el sistema MERIS, en el capítulo III la arquitectura de comunicación propuesta para MERIS y el modelado del sistema, en el capítulo IV los prototipos desarrollados, los cuales se dividen en dos partes, la primera la adaptación del nodo CEI para el proyecto MERIS y la segunda la implementación de la arquitectura de comunicación propuesta sobre la WSN IRIS de la Universidad del Cauca; en el capítulo V la descripción general de las diferentes pruebas realizadas y resultados obtenidos en la fase de validación de los dos prototipos implementados y finalmente en el capítulo VI se mencionan las conclusiones, recomendaciones y experiencias obtenidas en el desarrollo del proyecto.

CAPÍTULO 1 REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES

Este capítulo presenta las temáticas relacionadas con las WSN. Se inicia con las generalidades, continuando con la descripción de un tipo de arquitectura característico de este tipo de redes, luego se describe el protocolo de comunicaciones *ZigBee*, después se hace mención de algunos inconvenientes que se presentan en las WSN, posteriormente las principales aplicaciones y finalmente el modelo conceptual construido acerca de las WSN.

1.1 Generalidades

La investigación y el interés comercial en el área de las WSN están creciendo exponencialmente [4]. Las redes de sensores son esencialmente un conjunto de nodos, generalmente autoalimentados que capturan y procesan información de su entorno o detectan determinados fenómenos que comunican unos con otros de manera inalámbrica, haciendo disponible esta información sobre una base de datos central figura 1.

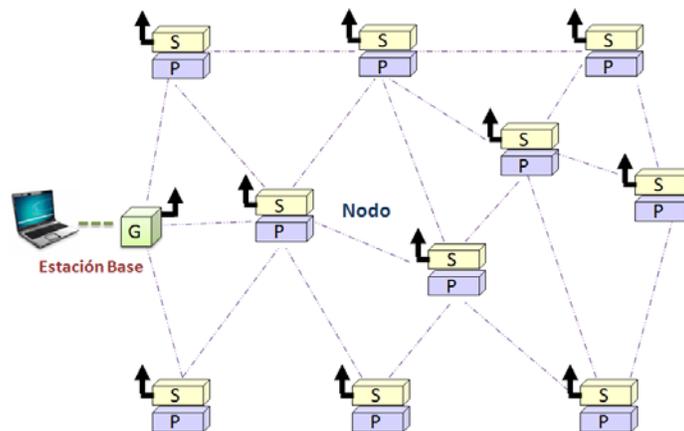


Fig. 1 Red Inalámbrica de sensores

Los elementos de una WSN son: los sensores (S, figura 1), los cuales capturan del medio la información y la convierten en señales eléctricas; los nodos o motas (P, figura 1) que procesan la información dada por los sensores y la envían a la estación base; la *Gateway*, (G, figura 1), que sirve como puente de conexión entre la WSN y una red de datos (TCP/IP) y la estación base encargada de recolectar los datos, basada en un PC o en un sistema embebido.

Cada nodo de la red consta de un dispositivo con un sistema de control, sensores, fuente de potencia (casi siempre una batería) y un transmisor/receptor. Debido a las limitaciones de la vida de la batería, los nodos se construyen teniendo presente la conservación de la energía, y generalmente pasan mucho tiempo en modo 'durmiente' (*sleep*) de bajo consumo de potencia.

Un nodo es capaz de procesar una limitada cantidad de datos, pero cuando se coordina la información entre un importante número de nodos, éstos tienen la habilidad de medir un medio físico con gran detalle. No todos los nodos son necesariamente iguales; por ejemplo, algunos pueden tener un radio de mejor rango o más memoria. Entre las principales características de las WSN se encuentran:

- Capacidad de auto-organización: la naturaleza *ad hoc* de la WSN permite un sencillo ajuste y configuración, tarea que no debe subestimarse cuando la red es de considerable tamaño.
- Los nodos al ser pequeños y autónomos, presentan severas restricciones energéticas; la comunicación es el consumidor primario de energía.
- Comunicación de corto alcance y con multitrayectoria.
- Topología de red cambiante: debido a que el despliegue de los nodos es incremental y estos pueden ser sustituidos o eliminados.
- Limitaciones de energía, potencia de transmisión, memoria, y procesamiento.
- Operan en las bandas ISM (*Industrial, Scientific, Medical*): 315 MHz (Japón), 433, 868 MHz (Europa), 915 MHz (*Americas*), 2.4 GHz (Todo el Mundo).

Las WSN aparecen como una solución tecnológica viable para resolver el escenario problemático del proyecto MERIS dado que estas son adecuadas para las situaciones en las cuales la localización de un fenómeno físico es desconocida y el medio que va a ser monitorizado no tiene una infraestructura, ni para el suministro energético, ni para la comunicación, condiciones típicas de una situación de emergencia por catástrofe.

Las WSN, tienen una corta historia, a pesar de ello, ya se tienen varios fabricantes trabajando en esta tecnología, como son [5]:

- **CROSSBOW**: es una empresa que desarrolla plataformas hardware y software que dan soluciones para las WSNs. Entre sus productos encontramos las plataformas Mica, Mica2, Micaz, Mica2dot, Telos, Telosb e IRIS [6].
- **MOTEIV**: Ha desarrollado la plataforma Tmote Sky (equivale al TelosB de Crossbow) y Tmote Invent. Plataforma creada específicamente para facilitar la investigación y el desarrollo de redes de sensores. No son modulares, estando contenida toda la funcionalidad en una sola placa [7].
- **SHOCKFISH**: Empresa suiza que desarrolla TinyNode. A partir de este tipo de mota en Laussane implementan una WSN en todo el campus de la *Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne* [8].
- **Intel**: ha desarrollado el *iMote*, cuentan con el sistema operativo *TinyOS* y conectores verticales para conseguir modularidad [9].

1.2 Arquitecturas para WSN

El diseño de la arquitectura de una WSN se ve influenciado por diversos factores tales como la tolerancia a fallas, escalabilidad y consumo de energía. Para el diseño de una WSN existen dos estilos arquitectónicos básicos: (1) por nodos en un conjunto con jefe y subalternos, y (2) por rango geográfico de cobertura [10]. La primera opción, no es apta para el escenario del proyecto MERIS porque los pacientes van a estar dispersos en una área grande de terreno, por lo cual se requerirá saltos en la comunicación y esta arquitectura no los considera, por tanto, a continuación se describe la arquitectura por rango geográfico de cobertura que es la apropiada para MERIS.

1.2.1 Rango geográfico de cobertura

En esta existe un nodo central, y diversos rangos de alcance que se le denominan saltos, donde el primer salto es el primer rango de cobertura dentro del cual se encuentra el nodo o los nodos más cercanos al nodo central, figura 2.

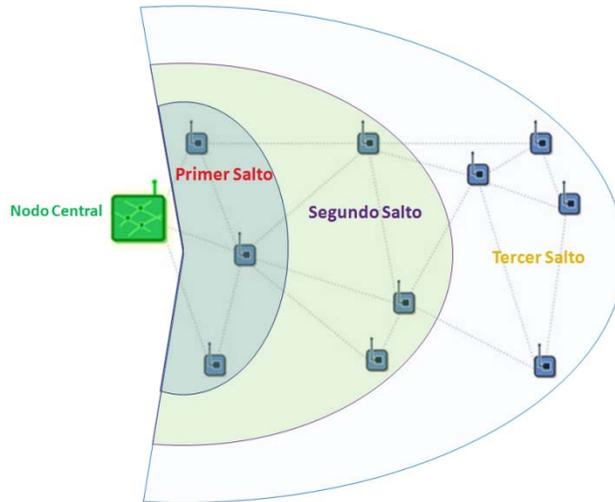


Fig. 2 Arquitectura de rangos

En esta arquitectura el nodo central, detecta los nodos que se encuentran en el primer rango geográfico y les asigna un identificador, que corresponde a una dirección única de acuerdo al número de nodos que tiene la red. Posteriormente, el rango de muestra se amplía por los nodos y se descubren los nodos del segundo, tercer rango y sucesivamente hasta que el área geográfica ha sido cubierta, de igual forma se les asigna su identificador. Cada vez que un nodo se comunica con otro se dice que se encuentra a un salto, por otra parte cuando se tiene que el nodo al cual se requiere comunicar se encuentra lejos, se emplean los otros nodos para efectuar la comunicación para lo cual se hace mediante diversos saltos (efecto multi_salto). Esta arquitectura permite que la información de los nodos se propague de enlace en enlace hasta el nodo central. El nodo que transmite es seleccionado conforme a su nivel de energía, con el propósito de alargar la longevidad de la red.

El *Unified Network Protocol Framework* (UNPF) desarrollado por la Universidad de Washington [11] es un conjunto de protocolos que son parte de la arquitectura de rangos para redes de sensores. UNPF integra tres operaciones dentro de su propia estructura como el protocolo de inicialización y mantenimiento, el de control de acceso al medio y por último, el de enrutamiento de información.

1.2.1.1 Protocolo de iniciación y mantenimiento de red

El nodo central radiodifunde su identificación usando CDMA (*Code Division Multiple Access*), todos los nodos escuchan el canal y guardan la identificación del nodo central, ellos a su vez mandan de vuelta sus identificaciones. Con esto, el nodo central sabe que aquellos nodos que pueden escuchar (debido a que conocen el código para descifrar la información) se encuentran en su primer salto. Subsecuentemente, el nodo central difunde un paquete de control con las identificaciones de los nodos del primer rango y los

nodos que escuchen responden con una señal de control, así todos los nodos del primer rango registran las identificaciones de los otros nodos, formando estos el segundo rango. Esto continúa hasta que se haya barrido toda la red en busca de nuevos nodos, logrando así que la estructura de rangos se forme mediante rondas sucesivas de búsqueda. Periódicamente, se actualiza la información de los nodos y la estructura de los rangos ya sea por la adición o eliminación de estos.

1.2.1.2 Protocolo de control de acceso al medio

Este protocolo se ejecuta de forma previa a la fase de transmisión de información por lo que el canal transmisor distribuido lo solicita. Cada nodo tiene asignado un canal de recepción dado por el nodo central, y el canal es reutilizado para evitar colisiones. La transmisión de los nodos se segmenta en ranuras de tiempo para todos los nodos vecinos, esto permite que la transmisión se realice libre de colisiones y se ahorre energía cada vez que los nodos se encuentren en modo de bajo consumo ya que no realiza ninguna operación envío/recepción. Las dos funciones que realiza el DTROC (*Distributed TDMA Receiver Oriented Channel*) son la asignación de canal de recepción para los nodos y la segmentación para compartir el canal de recepción entre los nodos vecinos.

1.2.1.3 Protocolo de Enrutamiento

La responsabilidad de este protocolo es el intercambio de información, encontrando el camino más confiable para alcanzar el destino deseado teniendo en cuenta la distancia, el requerimiento mínimo de energía y el tiempo de vida del enlace inalámbrico; búsqueda de la información en el caso de que la conexión falle; reparación de los enlaces caídos gastando el mínimo de potencia de procesamiento y mínimo uso del ancho de banda.

En los algoritmos de encaminamiento *multi-hop* o planos, cuando un sensor quiere transmitir un dato, lo entrega al vecino más cercano al nodo central. A su vez, dicho vecino seleccionará al vecino más cercano al nodo central, y así sucesivamente. De esta forma, se construye una estructura arborescente sobre la red, que incluye a todos los sensores de la misma y cuya raíz es, precisamente, el nodo central. Entonces, los datos captados por los sensores fluyen por las ramas de este árbol, desde las hojas hacia la raíz. El algoritmo *XMesh*, de Crossbow, funciona de esta manera. El inconveniente de estas técnicas es que reducen el tiempo de vida de la batería de los nodos más cercanos al nodo central.

Otros algoritmos de encaminamiento, denominados *cluster-based* o jerárquicos, crean grupos de nodos en la red y eligen un sensor (el *cluster head*) en cada uno de estos grupos. Dicho nodo será el responsable de encaminar la información captada por los miembros de su grupo hacia el *cluster head* en otro grupo vecino o directamente hacia el nodo central. Estos algoritmos son más rápidos, escalables y eficientes que los anteriores, pero encierran una mayor complejidad, ya que deben contemplar mecanismos para crear y mantener los grupos.

1.3 Protocolo de Comunicaciones

El protocolo de comunicaciones líder en WSN es *ZigBee* que más que una tecnología, es un conjunto estandarizado de soluciones para conectividad inalámbrica de corto alcance con un bajo consumo de potencia [12]. *ZigBee* está especialmente diseñada para grandes redes de sensores, con las características inherentes a ellas: fiabilidad, larga duración de

las baterías de los dispositivos, bajos costes, tamaño diminuto y complejidad reducida, sin requerimientos de calidad de servicio importantes. El objetivo, es ofrecer un estándar abierto, eficiente, de poco consumo e inalámbrico para la monitorización y control de dispositivos. *ZigBee* se caracteriza de otras tecnologías, entre otros aspectos por:

- Un bajo consumo de potencia, con lo cual se obtienen baterías de larga duración y bajo coste. En una red *ZigBee* los nodos tienden la mayor parte del tiempo a estar “dormidos” con objeto de consumir menos que otras tecnologías inalámbricas. El objetivo, es que un nodo sensor dure varios meses y hasta años.
- Permite el direccionamiento de más de 65.000 dispositivos, además de posibilitar la asociación y disociación de redes. Esta cantidad de nodos hace inmanejable la administración, se menciona que una red no debería tener más de 3000 nodos y para redes mas grandes se recomienda usar múltiples subredes, en lugar de tener una sola red muy grande.
- Baja latencia: los dispositivos *ZigBee* no tienen que sincronizarse con otros nodos en la red antes de conectarse a la red e iniciar comunicación. De hecho, los dispositivos requieren solo 30 ms para unirse a la red y 15 ms para acceder e iniciar la comunicación con otros nodos según el estándar [12].

Entre las funciones del estándar *ZigBee* se encuentran:

1. La búsqueda de red, donde un dispositivo sondea los canales dentro de su rango de comunicaciones, este rango es llamado a menudo POS (*Personal Operating Space*).
2. Creación de una red de área personal (PAN, *Personal Área Network*) sobre canales sin utilizar, en el POS.
3. Descubrimiento de dispositivos en la PAN.
4. Descubrimiento de servicios soportados en los dispositivos dentro de una red.
5. Unión (*Binding*) para comunicarse a nivel de capa aplicación con otros dispositivos en la red.
6. Asociación y disociación de dispositivos.
7. Configuración de un nuevo dispositivo.
8. Direccionamiento por parte de un coordinador *ZigBee* para asignar direcciones a dispositivos nuevos en la red.
9. Sincronización en una red a través del envío de tramas *beacon* o mediante *polling*.
10. Seguridad, aplicándola a las tramas transmitidas y retirándola de las tramas recibidas.
11. Asignación de ruta (*Routing*), enrutamiento de tramas a sus direcciones establecidas.

1.3.1 Tipos de Dispositivos

Examinando los esquemas se puede establecer que las redes *ZigBee* constan de los siguientes tipos de dispositivos:

Coordinador de red: hay uno y solo uno en cada red, se encarga de inicializar la red y mantener en todo momento el control del sistema. Es el más complejo de todos los dispositivos, ya que necesita memoria y capacidad de computación para almacenar información acerca de la red, actuar como un enrutador y servir como puente con otras redes. Puede ser enlazado a la raíz de una red en configuración árbol.

Dispositivo de función completa FFD: es un componente opcional, es capaz de recibir mensajes del estándar 802.15.4. Gracias a la memoria adicional y a la capacidad de computar, es ideal para funcionar como enrutador intermediario que transmite datos de otros dispositivos o para ser usado en dispositivos de red que actúen de interface con los usuarios. Opera en todas las topologías y puede funcionar como coordinador, aunque, no es necesariamente un coordinador. Si un mensaje llega a un dispositivo FFD, comprueba la dirección de destino, y solo lo reenvía si pertenece a alguno de sus hijos (es decir, pertenece a alguno de los RFD que están asociados a él). Si es para él, lo pasa a la capa superior. En otro caso se descarta.

Dispositivo de función reducida RFD: Este dispositivo tiene capacidad y funcionalidad limitada. Requiere menor memoria que ningún otro tipo de nodo. Solo intercambia información con el coordinador y se implementa muy fácilmente en la topología de estrella. Con lo cual se consigue un bajo coste y una gran simplicidad. Básicamente, son los sensores/actuadores de la red.

1.3.2 Topologías de Red

Las especificaciones del estándar permiten tres diferentes topologías de red: en estrella, árbol y malla, figura 3.

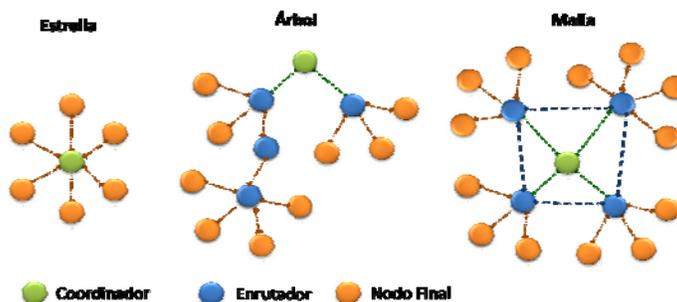


Fig. 3 Topologías *ZigBee*

1.3.2.1 Estrella

En la topología estrella un coordinador que puede ser un dispositivo tipo FFD, puede hacer uso de la trama de sondeo o *beacon* para definir la estructura de supertrama y para sincronizar todos los nodos de la red a él. Dentro de la supertrama se establecen dos periodos uno de actividad y otro de inactividad. De esta forma se permite que los nodos desactiven sus transceptores durante los periodos de inactividad para ahorrar potencia. Después del periodo de inactividad el nodo habilita de nuevo su transceptor para adquirir el *beacon* y mantener la sincronización con el coordinador.

El periodo de actividad de la supertrama contiene 16 *slots* que se integran en tres campos. El primero es el campo de *beacon*, el segundo es el CAP (*Contention Access Period*) y el tercero es el CFP (*Contention Free Period*) que contiene un número programable de *slots*, con un máximo de 7. Durante el periodo CAP, que comienza justo al finalizar el *beacon*, los nodos pueden enviar tramas al medio utilizando el acceso CSMA. El coordinador con la información enviada en el *beacon* asigna los *slots* dentro del CFP a unos determinados nodos, los cuales pueden enviar tramas durante estos *slots* sin ningún tipo de contención, ya que lo tienen asignado para su uso exclusivo.

En cada *beacon* el coordinador informa cuales son los nodos para los cuales tiene información pendiente. Si un nodo después de recibir el *beacon* detecta que no hay ninguna transmisión pendiente para él, puede volver al estado de inactividad. Es claro que cuanto mayor es el periodo entre *beacons* mayor es el ahorro de potencia. Pero al aumentar este periodo también aumenta la latencia en las transmisiones dentro de la estrella, ya que los nodos no podrán extraer o enviar información del coordinador hasta el próximo *beacon*.

1.3.2.2 Topología en Árbol

En esta topología de red se tiene la asociación de varias redes en donde, el coordinador forma el primer *cluster* y se establece a sí mismo como *Cluster Head* (CH) con su respectivo *Cluster Identifier* (CID) igual a cero. Además, este elige un identificador PAN y envía tramas *beacons* a todos los dispositivos vecinos. Las redes que deseen asociarse al *cluster* 0 pueden hacerlo a través de cualquier dispositivo de su red. Además, los coordinadores deben establecerse como *Cluster Head* y tomar su respectivo CID.

1.3.2.3 Malla o Mesh

En la topología de igual a igual o malla todos los nodos pueden alcanzar los demás nodos de la red. Aunque existe también un coordinador, éste no emite *beacons* y la información se transmite directamente desde un nodo origen hasta un nodo destino. En este caso el coordinador sólo realiza tareas de control sobre los nodos que se permite que se suscriban a la red y para distinguir una red de otras vecinas. Como no existe ningún método de sincronización ni de asignación del canal, el acceso al medio establecido es CSMA/CA que tiene en cuenta la contención producida por el envío simultáneo de varios nodos.

En esta configuración todos los nodos se conectan y se comunican directamente con otros nodos que se encuentren dentro del rango de cobertura, también evita problemas respecto a otras topologías que podrían requerir líneas de vista despejadas entre los nodos, en efecto, los datos pasan por cualquier conjunto de nodos entre el transmisor y el receptor.

1.3.3 Estructura de Trama MAC

En la figura 4, se presentan las partes que componen la unidad de datos del protocolo MAC (*MAC Protocol Data Unit*) y los tipos de trama MAC.

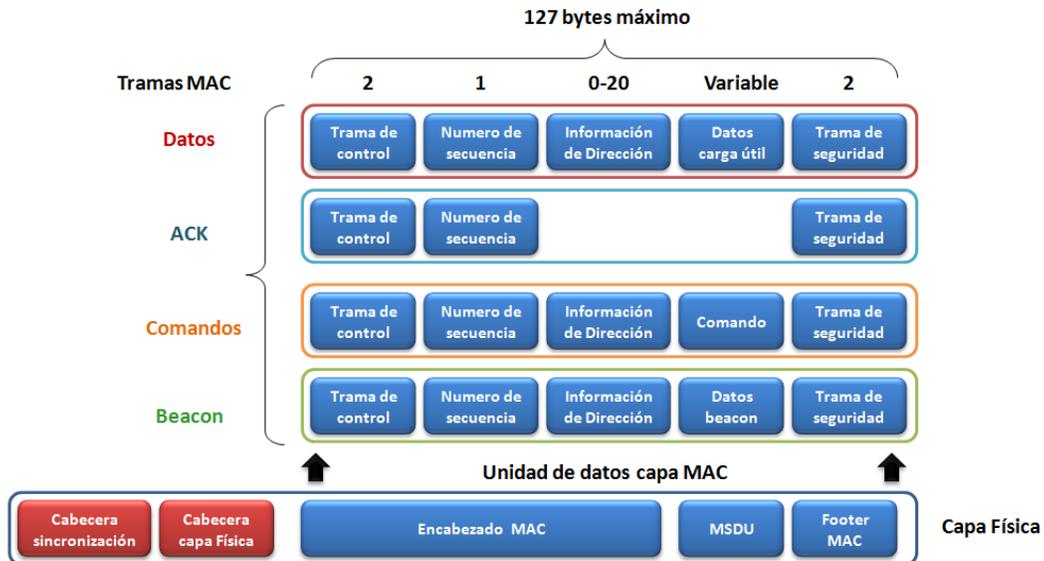


Fig. 4 Estructura de Trama MAC

La unidad de datos MAC está compuesta por:

Encabezado MAC que se compone de tres campos, el primero es el de control de la trama de 2 bytes, el cual indica el tipo de trama MAC que se está transmitiendo, especifica el formato del campo de dirección y controla el ACK, el segundo es el número de secuencia de un byte que especifica el identificador de secuencia único de cada trama. Una transmisión se considera exitosa solo cuando la trama ACK contiene la misma secuencia de números que la secuencia anterior transmitida, y el último es la información de dirección que puede ser de 0 a 20 bytes, esta contiene a su vez el identificador único de la PAN a la que va dirigida la trama (0/2 Bytes), la dirección de destino (0/2/8 Bytes), el identificador único de la PAN que origina la trama (0/2 Bytes) y la dirección de origen (0/2/8 Bytes), una trama puede contener información tanto de la fuente como el destino o solo de la fuente para el caso de la trama *beacon*.

MSDU (*MAC Service Data Unit*) contiene la carga útil, es de longitud variable pero debe considerarse que la trama MAC completa no puede exceder de 127 bytes. Los datos contenidos en la trama dependen del tipo de trama.

MAC Footer es el *Frame Check Sequence* de 2 bytes, ayuda a verificar la integridad de la trama MAC por medio de un CRC de 16 bits.

Para operar, el estándar establece cuatro tipos o estructuras de trama, figura 4:

Trama de Beacon: se usa para poder sincronizar todos los dispositivos que conforman la red, identificando la red y describiendo la estructura de la supertrama. Los intervalos de los *beacons* son predeterminados, asignados por el coordinador de red y pueden variar desde los 15 ms hasta los 245 segundos.

Trama de datos: tiene un tamaño máximo de datos de hasta 104 bytes y está numerada para evitar la pérdida de información. Al igual que la trama *beacon* lleva información de capas superiores.

Trama ACK: es una realimentación desde el receptor al emisor, para confirmar que el paquete se ha recibido sin errores. Se puede incluir un ‘tiempo de silencio’ entre tramas, para enviar un pequeño paquete después de la transmisión de cada paquete.

Trama de Comandos MAC: se utiliza para el control remoto y la configuración de dispositivos/nodos. Una red centralizada utiliza este tipo de tramas para configurar la red a distancia. Al igual que la trama de ACK, se origina en la MAC y se usa para comunicaciones punto a punto a nivel MAC.

1.4 Sistemas operativos para WSN

Los Sistemas Operativos (SO) para la programación de los nodos de una WSN son típicamente menos complejos que los SO de propósito general debido a la limitación de recursos en términos de memoria que existen en las plataformas hardware de las WSN. El *hardware* de las WSN no es diferente de los sistemas embebidos tradicionales, lo cual hace posible el uso de los SO para sistemas embebidos tales como eCOs o uC/OS para redes de sensores, sin embargo existen propuestas a nivel de SO específicas para este tipo de entornos, entre los que se encuentran [5]:

- **Bertha** es una plataforma de software diseñada e implementada para modelar, testear y desplegar una red de sensores distribuida de muchos nodos idénticos, Sus principales funciones se dividen en los siguientes subsistemas: administración de procesos, manejo las estructuras de datos, organización de los vecinos e Interfaz de Red [13].
- **Contiki:** es un SO *open source*, programable en C, altamente portable, su núcleo es un manejador de eventos, es un SO para usar en un limitado tipo de computadoras, desde los 8 bits a sistemas embebidos en microcontroladores tales como el MSP430 de *Texas Instruments* y el Atmel AVR, incluidas motas de redes inalámbricas [14].
- **MagnetOS:** es un SO distribuido para redes de sensores o *ad hoc*, cuyo objetivo es ejecutar aplicaciones de red que requieran bajo consumo de energía, adaptativas y fáciles de implementar [15].
- **TinyOS:** es un sistema operativo “*open source*”, desarrollado por un consorcio liderado por la Universidad de California en *Berkeley* en cooperación con Intel Research, como sistema base para la construcción de sistemas embebidos que incorporan el manejo de redes inalámbricas [16].
- **SOS:** es un sistema operativo desarrollado en la Universidad de California, específicamente en el NESL (*Networked & Embedded Systems Laboratory*). Implementa un sistema de mensajería que permite múltiples hilos entre el sistema operativo y las aplicaciones, las cuales pasan a ser módulos que pueden ser cargadas o descargadas en tiempo de ejecución sin interrumpir el núcleo del sistema operativo. Las características del kernel de SOS son: módulos cargados dinámicamente, programación flexible de prioridades y un subsistema simple de memoria dinámica [17].

Dada las características de las redes de sensores inalámbricas, se hace crítico el uso de tecnología estable y con perspectivas a futuro. Si bien la mayoría de los sistemas estudiados satisfacen las restricciones expuestas, la existencia de una base sólida sobre la cual comenzar a desarrollar aplicaciones en el contexto de MERIS, contando con la información necesaria, es esencial y crítica.

Hoy en día *TinyOS* se perfila como el estándar para las redes de sensores inalámbricas, debido principalmente a su extenso uso por parte de desarrolladores de aplicaciones para este tipo de sistemas. La gran cantidad de grupos de trabajo, el soporte existente en documentación, las plataformas soportadas (gran disponibilidad de librerías que sólo deben ser cargadas en el momento de desarrollar una aplicación), las múltiples aplicaciones desarrolladas, su madurez y finalmente el amplio uso (que verifica su funcionalidad) hace de *TinyOS* una alternativa más segura y conveniente en la hora de tomar una decisión.

En consecuencia, el sistema operativo utilizado en este proyecto es *TinyOS* porque este responde óptimamente a las características y necesidades de las redes de sensores, tales como reducido tamaño de memoria, bajo consumo de energía, operaciones de concurrencia intensiva (simultaneidad en la ejecución de múltiples tareas interactivas). Además se encuentra optimizado en términos de uso de memoria y eficiencia de energía, es *Open Source*, fácil para aprender, provee un ambiente de simulación (TOSSIM), cuenta con una cantidad numerosa de aplicaciones preconstruidas, las cuales implementan procesamientos de datos y algoritmos de enrutamientos, su estructura es altamente modular y principalmente es compatible con los nodos de la WSN IRIS sobre la cual se hace parte de la experimentación. A continuación se presenta de forma resumida *TinyOS* y *NesC*, que es el lenguaje de programación utilizado para los nodos.

1.4.1 *TinyOS*

TinyOS tiene una arquitectura *basada en componentes* que le permite incorporar nuevas funcionalidades rápidamente y funcionar bajo las restricciones de recursos que se dan en las redes de sensores [18]. Por otra parte, su ejecución está *dirigida por eventos*, lo cual permite un control fino del consumo energético y una flexibilidad en la ejecución de tareas que es necesaria debido a la naturaleza impredecible de las comunicaciones inalámbricas y las interfaces con el mundo real. Los objetivos del sistema operativo *TinyOS* son:

- Soportar sistemas embebidos en red, lo cual implica: poder tener al sistema inactivo pero vigilante a estímulos. Así, el sistema está inactivo el mayor tiempo posible y solo se activa cuando hay un estímulo exterior para realizar los cálculos y tareas necesarios, para regresar a su estado de inactividad lo más rápido posible.
- Ser fácilmente escalable y compatible con numerosos proveedores.
- Brindar soporte al desarrollo económico y ágil de aplicaciones para WSNs.

Así, el diseño de *TinyOS* está basado en un núcleo multi-hilo, con capas de abstracción bien establecidas y limitadas claramente a nivel de interfaces, a la vez que se pueden representar los componentes automáticamente a través de diagramas, emplea un paradigma de comunicación basado en *Active Message* [19] y no maneja memoria dinámica. El núcleo tiene 2 tipos de estructuras o niveles de planificación:

- Eventos: pensados para realizar un proceso pequeño, se ejecutan cuando se produce un evento hardware o software, por ejemplo: interrupciones del temporizador, interrupciones de final de conversión analógico-digital, pueden interrumpir las tareas que se están ejecutando.
- Tareas: están pensadas para hacer una mayor cantidad de procesamiento por ejemplo: calcular el promedio en una tabla. No son críticas en el tiempo y no se interrumpen entre ellas por lo que la siguiente tarea sólo se ejecuta cuando termina la anterior (esto simplifica el núcleo del sistema al sólo necesitar una única pila). En las tareas de larga duración, la solicitud de iniciar una tarea y el término de ella son funciones separadas (característica propia de la programación orientada a componentes). Cabe mencionar que el concepto de tarea en *TinyOS* es no corresponde al de Tarea en tiempo real.

TinyOS está escrito en el lenguaje de programación *NesC* como un conjunto de tareas y procesos que colaboran entre sí, dirigido por eventos, es decir, reacciona ante sensores y mensajes. El código se ejecuta tanto asincrónicamente (interrupciones) como sincrónicamente (ejecución de tareas), con lo cual se tiene concurrencia de tareas y basada en eventos, además proporciona mecanismos para crear exclusión mutua en secciones de código (concepto de atomicidad).

Algunas de las funciones que puede ejecutar *TinyOS* son [20]: enrutamiento, Conversor Analógico Digital (ADC), identificación de un nodo, reserva de memoria, conversión serie-paralelo, pila de comunicación, radio, *active messages*, *logs* del sistema, reloj del sistema, energía del sistema, reiniciar el sistema, generador de números aleatorios, LEDs del sistema, gestión de errores a través de CRC.

1.4.1.1 *NesC*

NesC es un lenguaje de programación que se utiliza para crear aplicaciones que serán ejecutadas sobre el sistema operativo de *TinyOS*. Concretamente, se basa en una programación orientada a componentes, es decir, una aplicación se crea ensamblando componentes, esta filosofía permite abstraer al programador de bastantes detalles de bajo nivel de implementación presentes en el sistema operativo.

Un programa en *NesC* está estructurado mediante componentes, el programador crea su propio componente ayudado a su vez de otros componentes ya creados. Dos componentes podrán comunicarse entre sí mediante una interfaz, la cual definirá una serie de métodos (*commands* y *events*) los cuales deberán ser implementados en cada componente. Así, un método podrá solicitar la ejecución de un *command* de otro componente; por otro lado, para enviar una notificación se utilizarán un *event*. Entre las principales características de este lenguaje se tienen:

- Todo es estático, es decir, no hay reserva dinámica de memoria ni funciones a punteros.
- Durante la compilación se realiza un análisis de posible condición de carrera, la cual se presentarán principalmente en dos situaciones: la primera en cualquier modificación a un estado compartido desde un código asincrónico, y la segunda en cualquier modificación de un estado compartido desde un código sincrónico, que es también modificado desde un código asincrónico.

En general NesC, simplifica el desarrollo de aplicaciones, reduce el tamaño del código, y elimina muchas fuentes potenciales de errores al realizar optimizaciones en la compilación del programa, detectando posibles carreras de datos que pueden ocurrir producto de modificaciones concurrentes a un mismo estado, dentro del proceso de ejecución de la aplicación.

1.5 Limitaciones de las WSN

Las WSN son una tecnología que está incursionando en muchos entornos, a los cuales se hace mención posteriormente, esto ha motivado el interés de las empresas por mejorar los dispositivos con las cuales se construyen, sin embargo, existen aún muchas limitaciones que deben ser tenidas en cuenta en el diseño e implementación de soluciones basadas en WSN entre las que se encuentran:

- A nivel de Comunicación: las WSN están concebidas como redes de corto alcance y baja transferencia de datos, con fallas en la transmisión de datos, algunas veces producidas por obstáculos. Las WSN pretenden superar este problema mediante la auto-organización, redundancia y cooperación entre nodos en tareas de procesamiento y comunicación, sin embargo, estas técnicas afectan el consumo de potencia promedio del nodo que se encarga de retransmitir la información.

También se estima que en un nodo, la transmisión de un *bit* puede ser hasta mil veces más costosa en términos de potencia, que su procesamiento y/o almacenamiento, lo cual sugiere la creación de esquemas de procesamiento local que garanticen el manejo óptimo de los datos y el medio de transmisión.

Además, son comunes los problemas de interferencia, dado que la comunicación de se lleva a cabo sobre la banda ISM.

- A nivel de Alimentación: la autonomía de un nodo depende en gran medida de su capacidad de auto-alimentación la cual por lo general es provista por baterías doble A u otras fuentes limitadas. Ocasionalmente se presentan sobrecargas cuando se pide gran cantidad de potencia en periodos de tiempo muy cortos (como en el encendido de los circuitos de comunicación), disminuyendo considerablemente su tiempo de vida.
- A nivel de Organización: frecuentes variaciones en la topología de red debidas a la variabilidad en terreno, número de nodos y evolución de los eventos; el sistema debe asumir el sobre costo del redescubrimiento de la red, lo cual impacta negativamente sobre la batería del nodo coordinador, principalmente. El despliegue de los nodos es incremental y pueden ser reemplazados, adicionados o eliminados en cualquier número.
- A nivel de Sensado: la inadecuada selección de los elementos sensores puede conllevar a tiempos de vida relativamente cortos que trae por consecuencia el incremento en el costo de mantenimiento de la red. Además, la miniaturización de los nodos implica una limitación en tamaño de los componentes de la capa de sensado.

Aún cuando los avances tecnológicos son impresionantes, los nodos de una WSN tienen recursos limitados en memoria, energía y ancho de banda, con una capacidad de procesamiento reducida y de naturaleza distribuida. Por lo cual, es necesario tener en cuenta estas limitaciones durante el diseño de una solución basada en WSN.

1.6 Aplicaciones de las WSN

Las aplicaciones de esta tecnología abarcan muchos campos como son: el cuidado del medio ambiente, monitorización de un hábitat (para determinar la población y comportamiento de animales y plantas), observación del suelo o agua, el mantenimiento de ciertas condiciones físicas (temperatura, luz), control de parámetros en la agricultura, detección de incendios, terremotos o inundaciones, sensorización de edificios “inteligentes”, control de tráfico y aplicaciones medicas, siendo esta ultima el área de interés y por tanto se profundiza en el capítulo II. Entre las muchas empresas que desarrollan estas aplicaciones se encuentran:

- **XSILOGY Solutions**, compañía que provee WSN para aplicaciones como: organización de inventario de tanques, sistemas de distribución de flujos, monitorización medioambiental, defensa del hogar, etc [21].
- **ENSCO** investiga con WSN para aplicaciones meteorológicas [22].
- **EMBER** provee soluciones con WSN para automatización industrial, defensa y edificios inteligentes [23].
- **XYZ**: Integra WSN para el control de entornos en el interior de edificios [24].
- **Crossbow** desarrolla WSN para monitorizar entornos, aplicaciones industriales tales como puentes, estructuras, calidad del aire/comida, automatización industrial [6].
- **DEXMA** ofrece productos y servicios especializados en WSN y Sistemas de Localización en Tiempo Real (RTLS) a consultoras, integradores, ingenierías y fabricantes que trabajan en los sectores de: logística, transportes, industria, energía, emergencias, sanidad y agricultura [25].
- **Japan's Omron Corp** ha elaborado una red de sensores para naves de carga que provee un sistema de seguridad en los puertos [26].

Otras referentes se encuentran en [27] [28] [29] [30].

1.7 Resumen

A continuación, se presenta en la figura 5 un diagrama que resume los conceptos relacionados con la WSN, en forma de mapa mental.

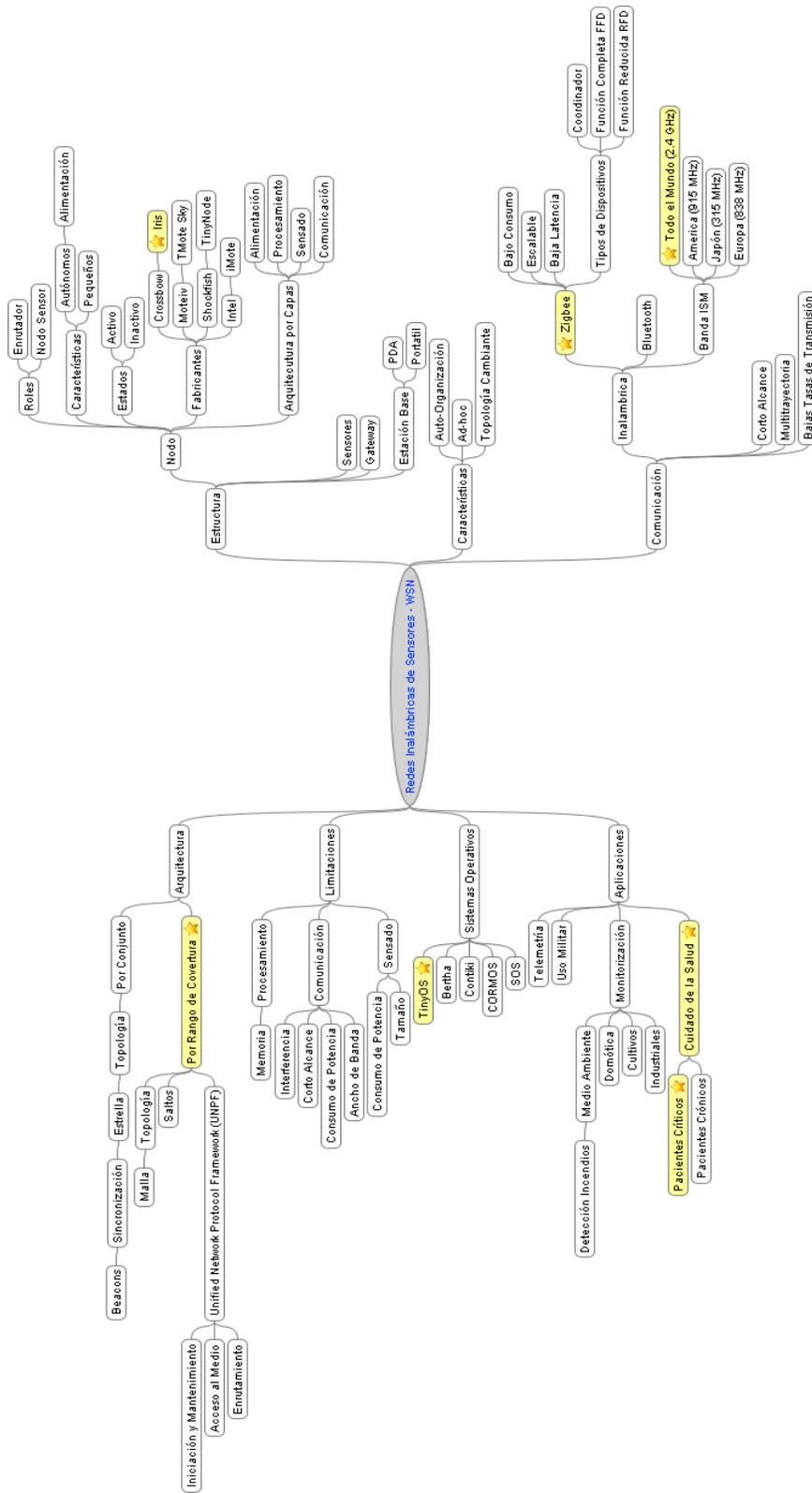


Fig. 5 Mapa conceptual, capítulo 1

CAPÍTULO 2 WSN DESDE LA PERSPECTIVA MÉDICA

En un informe de *ON World* [31] titulado "*WSN for Healthcare*" se estima que las WSN pueden reducir los costes de salud anuales en 25.000 millones de dólares estadounidenses para el año 2012. Buena parte de estos ahorros se derivan de la reducción de las hospitalizaciones y de la ampliación de la vida independiente de los adultos mayores.

Teniendo en cuenta que la WSN para MERIS fue concebida como una herramienta para la clasificación rápida y constante de las víctimas de una catástrofe humanitaria a través de sus signos vitales y que se requiere la adaptación de el nodo CEI, en este capítulo se introducen los conceptos relacionados con los sistemas basados en WSN para el monitoreo de las constantes vitales. En la primera parte, se aborda la definición de los signos vitales enfatizando en sus rangos de medida; luego, se presentan algunos antecedentes para sistemas de monitorización de signos vitales con WSN, aunque no todos los proyectos mencionados son soluciones para situaciones de emergencia médica sirven como referentes; en seguida, se presentan algunas características deseables de una WSN para el cuidado de la salud, a continuación se mencionan algunas situaciones médicas críticas en una emergencia con el fin de determinar las restricciones temporales que existen en este tipo de escenarios; finalmente, se hace una descripción del sistema MERIS teniendo en cuenta la perspectiva medica y tecnológica aquí descrita y la información suministrada por las entidades de socorro seccional Cauca que hacen parte del proyecto MERIS, que permitieron seleccionar los signos vitales a medir y el método de clasificación de pacientes.

2.1 Signos vitales

Los signos vitales son indicadores que reflejan el estado fisiológico de los órganos vitales (cerebro, corazón, pulmones). Estos expresan de manera inmediata los cambios funcionales que suceden en el organismo, por tanto constituyen una herramienta valiosa como indicadores que son del estado funcional del paciente [32]. Los cuatros principales signos vitales son:

Frecuencia cardiaca (FC): se mide como el número de veces que el corazón late por minuto, esta puede variar considerablemente como resultado de una serie de factores como la actividad desarrollada, respuesta emocional, lesión, etc. Sin embargo, un pulso con frecuencia acelerada y poca fuerza pueden ser signos de un shock hemorrágico. Un pulso con ritmo irregular, generalmente es un signo de impedimento cardiaco. El pulso normal varía de acuerdo a diferentes factores; el más importante es la edad. En la tabla 1 se presentan los valores normales para la FC, para un adulto se define la bradicardia para las pulsaciones por minuto menores a 60 y la taquicardia para las mayores de 100.

Tabla 1 Valores normales de frecuencia cardiaca

EDAD	PULSACIONES POR MINUTO
Recién nacido	120-170
Lactante menor	120-160
Lactante mayor	110-130
Niños de 2 a 4 años	100-120
Niños de 4 a 8 años	100-115
Adultos	60-80
Ancianos	60 o menos

Frecuencia respiratoria (FR): se suele medir cuando la persona está en reposo, y consiste en contar el número de respiraciones durante un minuto teniendo en cuenta las veces que se eleva su pecho, la respiración es el traspaso de oxígeno del aire a la sangre, y la salida del dióxido de carbono de la sangre al aire. La FR puede aumentar con la fiebre, las enfermedades y otras condiciones médicas. En la tabla 2 se presentan los valores normales para la FR según la edad, donde es notorio que esta disminuye con los años de vida de la persona.

Tabla 2 Valores normales de la frecuencia respiratoria

EDAD	PULSACIONES POR MINUTO
Recién nacido	30-80
Lactante menor	20-40
Lactante mayor	20-30
Niños de 2 a 4 años	20-30
Niños de 4 a 8 años	20-25
Jóvenes	18-20
Adultos	15-20
Ancianos	Menos de 16 respiraciones.

La frecuencia respiratoria puede ser dividida en cinco niveles, tabla 3:

Tabla 3 Niveles de la frecuencia respiratoria

NIVEL	VALOR DE FR	IMPLICACIÓN	MANEJO
Apneico	0	El paciente no respira	Reanimación
Lenta (bradipnea)	FR<12	Isquemia cerebral	Ventilación asistida o total con Oxígeno >85%
Normal	12-20	Observación	Observación
Rápida (taquipnea)	20-30	Metabolismo anaeróbico	Administrar Oxígeno >85%
Muy rápida (taquipnea severa)	FR> 30	Indica hipoxia, metabolismo anaerobio, o ambas con la respectiva acidosis	Ventilación asistida con Oxígeno >85%

Temperatura: Es el equilibrio entre la producción de calor por el cuerpo y su pérdida. Cuando la temperatura sobrepasa el nivel normal se activan mecanismos como vasodilatación, hiperventilación y sudoración que promueven la pérdida de calor. Si por el contrario, la temperatura cae por debajo del nivel normal se activan mecanismos como aumento del metabolismo y contracciones espasmódicas que producen los escalofríos [32]. La temperatura normal del cuerpo de una persona varía dependiendo de su sexo, su actividad reciente, el consumo de alimentos y líquidos, la hora del día y, en las mujeres, de la fase del ciclo menstrual en la que se encuentren. En la tabla 4, se muestra los valores normales de temperatura según la edad.

Tabla 4 Niveles normales de Temperatura según edad

EDAD	GRADOS CENTÍGRADOS (°C)
Recién nacido	36.1-37.7
Lactante	37.2
Niños de 2 a 8 años	37
Adultos	36,5-37,2

Presión sanguínea: es una medida de la presión que ejerce la sangre sobre las paredes arteriales en su impulso a través de las arterias. Debido a que la sangre se mueve en forma de ondas, existen dos tipos de medidas de presión: la presión sistólica, que es la presión de la sangre debida a la contracción de los ventrículos, es decir, la presión máxima; y la presión diastólica, que es la presión que queda cuando los ventrículos se relajan; ésta es la presión mínima. La Presión Arterial Media (PAM) se calcula con la siguiente fórmula:

$$PAM = \frac{\text{Presión sistólica} - \text{Presión diastólica}}{3} + \text{Presión diastólica}$$

Tanto la presión sistólica como la diastólica se miden en "mmHg" (milímetros de mercurio). En la tabla 5, se presentan los valores normales de presión arterial por grupo de edad.

Tabla 5 Presiones sanguíneas normales

EDAD	PRESIÓN SISTÓLICA (MMHG)	PRESIÓN DIASTÓLICA (MMHG)
Lactante	60-90	30-62
2 años	78-112	48-78
8 años	85-114	52-85
12 años	95-135	58-88
Adulto	100-140	60-90

A continuación, se detallan los antecedentes relacionados con el uso de las redes inalámbricas de sensores para el monitoreo de signos vitales de un paciente.

2.2 Sistemas de monitorización de signos vitales con WSN

En los últimos años, las investigaciones y desarrollos de redes de sensores para aplicaciones médicas, específicamente para la monitorización de pacientes, han ido aumentando tanto a nivel comercial como académico. Sin embargo, la mayoría de las propuestas encontradas parten de escenarios con condiciones diferentes a las dadas para situaciones de atención a desastres, tales como: alta escalabilidad, rápida configuración, costos moderados y carencia de recursos en infraestructura de red fija. No obstante, a continuación se mencionan algunos de estos tanto a nivel académico como comercial:

- Sistema de monitorización inalámbrica de sensores de SPO2 [33], el cual no es apropiado para el escenario MERIS, por una parte porque emplea Bluetooth como protocolo de comunicaciones, el cual limita el número de nodos de la red a 7 y por otra usa sensores comerciales como el pulsioxímetro marca comercial *Nonin Medical*, el cual no es adecuado para su incorporación con el nodo del CEI y su costo es elevado para una aplicación que involucra muchos pacientes como es el caso de MERIS.
- Sistema CustMED [34], el cual cuenta con sensores de temperatura, presión sanguínea y respuesta eléctrica de la piel, los cuales no son los signos objetivos de la propuesta MERIS, además el tiempo de vida del nodo es de máximo nueve horas, el cual es muy poco para una aplicación medica que debe considerar el desplazamiento de un grupo de pacientes.

- Sistema de monitoreo remoto de la presión sanguínea (*Blood Presion*, BP) y el ritmo cardiaco [35]. El cual, requiere de un grupo de enrutadores fijos para enviar la información de los sensores a la estación base, condición que lo hace inapropiado para las situaciones de emergencia debido a que no se conoce de antemano su ubicación.
- Sensores comerciales embebidos en trajes como *smartshirt* de Sensatex, que integra sensores para ECG de 3 terminales, pulso y respiración [36] o la camiseta de Vivometrics *LifeShirt* [37], los cuales son inconvenientes por su bajo rendimiento energético, que las hace no aptas para transmisiones mayores de 4 cm, no obstante se está trabajando en la integración de antenas Bluetooth en la propia ropa para alcanzar distancias mayores, aunque se mejore este aspecto la forma de uso de esta tecnología no es apropiada para un herido politraumatizado.
- Sensores académicos, como ACTis de la Universidad de Alabama [38], y *BodyNets* de la UCLA [39], los cuales requieren de infraestructura de red inalámbrica pre instalada lo que los hace no apropiados para situaciones con un alto nivel de incertidumbre como ocurren en las emergencias medicas. Esta condición también la cumple algunas versiones comerciales como es el caso de *Nihon Kodhen* que además utiliza puntos de acceso inalámbrico (*Wireless Access Point*), que limitan el número de pacientes [40].
- Los monitores médicos que existen se caracterizan por su alto costo, baja interoperabilidad y altas tasas de falsas alarmas, lo cual distrae la atención del personal médico [41].

En la exploración realizada se encontraron tan solo dos proyectos que abordan directamente el escenario problemático propuesto para el proyecto MERIS por lo tanto estos se presentan con mayor detalle a continuación.

2.2.1 **CodeBlue**

La Universidad de Harvard, en colaboración con el Centro Médico de Boston, el hospital *Spaulding Rehabilitation Center*, han desarrollado el proyecto *CodeBlue*, un conjunto de soluciones en el área de la medicina para hospitalizaciones, respuesta rápida ante desastres y rehabilitación, utilizando una WSN para capturar y procesar las constantes vitales de los pacientes automáticamente [42] [43] [44] [45]. El proyecto está subvencionado por el National Science Foundation, National Institutes of Health, U.S. Army, Sun Microsystems, Microsoft Corporation, Intel Corporation, y Siemens AG. *CodeBlue* cuenta con varios nodos implementados sobre las plataformas Mica2, Micaz y Telos [46], entre los cuales se encuentran:

Mote EKG es un lector de electrocardiograma para monitorear continuamente la actividad eléctrica del corazón de un paciente herido, enviando datos alrededor de una vez por segundo, figura 6a.

Mote Pulsoxímetro: mide la saturación de oxígeno en la sangre y frecuencia cardiaca figura 6b. La información de varios pacientes se recibe y puede ser desplegada en diferentes dispositivos como un asistente digital personal PDA, computadores portátiles, este dispositivo genera alarmas visuales y auditivas cuando las señales recibidas exceden

los rangos predeterminados. Este proyecto se integra con la iniciativa IRevive [47], la cual propone un formato de transferencia de información médica.

Mote de Captura de Movimiento y sensores EMG: permite capturar el movimiento de las extremidades y la actividad muscular, el mote es utilizado en pacientes con la enfermedad de Parkinson en el hospital *Spaulding Rehabilitation*.

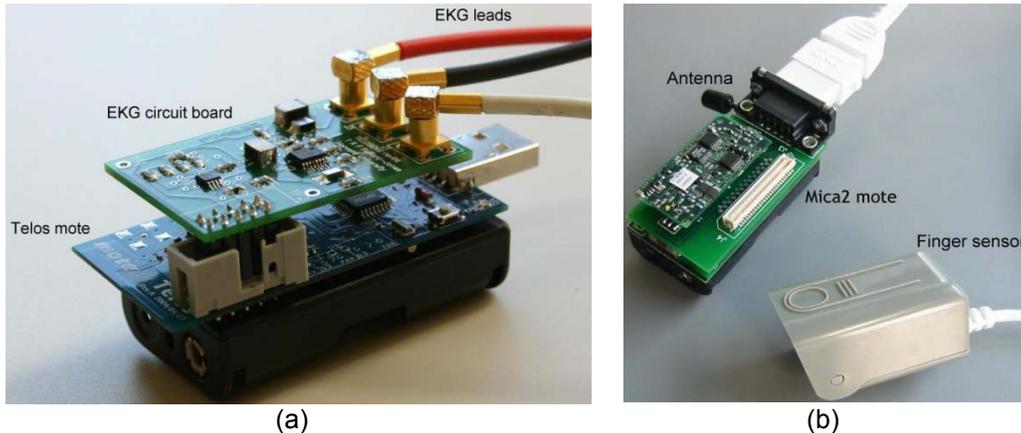


Fig. 6 (a) Mote EKG, (b) Mote pulsoxímetro

MoteTrack ofrece la ubicación de los pacientes que se encuentran dentro de un edificio, la cual es relativa a la posición del socorrista, es medida a través del Indicador de Fuerza de la Señal Recibida (RSSI) y una posición 3D conocida, y tiene un margen de error de dos metros [48].

En colaboración con el *Motion Analysis Laboratory* del Hospital Spaulding Rehabilitation se ha desarrollado otro tipo de mote para monitorizar el movimiento y actividad muscular de los pacientes durante sus ejercicios de rehabilitación. Estos dispositivos disponen de un acelerómetro de 3 ejes, un giroscopio, y sensores de electrocardiogramas (EMG) [49].

Los avances de *CodeBlue* son considerables sin embargo se maneja la priorización de los mensajes (según el *triage* del paciente) como único criterio para su oportuno enrutamiento, lo cual lo hace inadecuado cuando se presentan situaciones en las cuales se tienen varios paquetes con una misma prioridad.

2.2.2 Advanced Health and Disaster Aid Network: AID-N

El proyecto *Advanced Health and Disaster Aid Network: AID-N* [50] investiga un conjunto de tecnologías para brindar una respuesta rápida ante desastres, su principal objetivo es facilitar la comunicación entre personal de atención presente en una catástrofe y el profesional de especialistas para efectos de consultoría. Los participantes del proyecto son: el Instituto médico *Jhon Hopkins*, la Escuela de ingeniería y ciencias aplicadas de la Universidad de *Harvard*, los Departamentos de ciencias computacionales de la Universidad de California y la Universidad de Virginia. El hardware del nodo fue desarrollado en la Universidad de Virginia, pero el software que corre sobre la red es el del sistema *CodeBlue* [51].

Desde su formulación el nodo AID-N ha evolucionado [52], actualmente se conoce como *miTag* (*Medical Information Tag*) [53], el cual soporta diversos sensores tales como: GPS, pulsoxímetro [54], presión sanguínea, temperatura y EKG, cuenta con una pantalla LCD donde se visualiza la clasificación del paciente, figura 7. El sistema incluye el *miTag*, la estación base para monitorear y gestionar los pacientes, el sistema de localización de pacientes (GPS o Mote Track de *CodeBlue*) y PDAs para soportar la documentación y comunicación. AID-N esta soportado en plataformas MicaZ y TmoteSky Consume alrededor de 20 mA cuando esta activo, obteniendo un tiempo de vida de 5-6 días de operación continúa. La red ha sido probada por el departamento de *Homeland Security* y el Hospital de *Washington* brindando comunicación de aproximadamente 20- 30 metros en lugares cerrados con una máxima trasferencia de datos de 78.6 Kbps [55] [56].

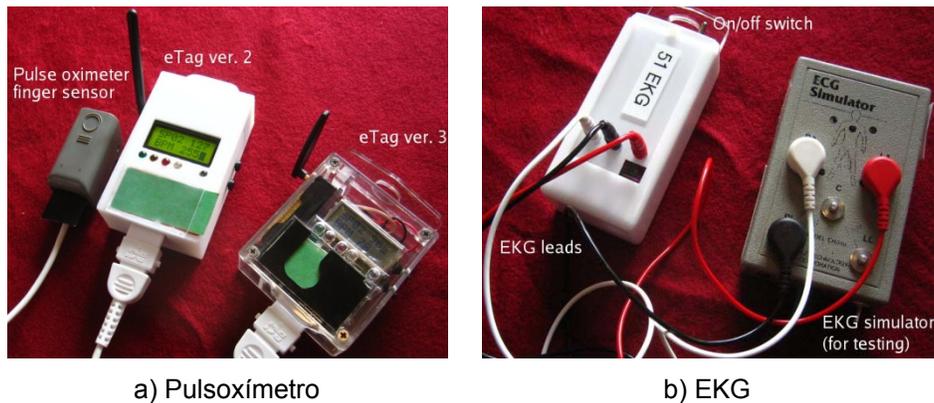


Fig. 7 Algunos de los sensores que Soporta *miTag*

El GPS *miTag* tiene un tiempo de vida de 17 horas, las cuales pueden aumentar si se obtiene su ubicación con menor frecuencia. Con excepción del sensor de presión sanguínea *miTag* el cual requiere una batería adicional de 9V el dispositivo puede ser alimentado por dos baterías AAA o por baterías recargables de litio de 3.7V.

En todas las propuestas se han encontrado 3 conceptos que son los pilares básicos hacia los que se está orientando la investigación en el campo de la monitorización de signos vitales, el primero la no invasión corporal, lo cual quiere decir que no se tiene que introducir en el cuerpo de la persona ningún elemento extraño que pueda producir cierto grado de dolor o molestia al realizar el proceso de monitorización, el segundo la pervasividad, lo que significa que el paciente no percibe que está siendo utilizada una determinada tecnología en él o sobre él para la monitorización de sus parámetros vitales, finalmente la ubicuidad, es decir, que está en todos los lugares, concretamente que la monitorización se pueda realizar independientemente de la ubicación en la que se encuentre el paciente

Aun cuando los referentes encontrados abordan directamente el problema propuesto, se encuentra que en común no incorporan directamente los conceptos de sistemas de tiempo real al desarrollo de su solución, lo cual no garantiza la confiabilidad del sistema, al mismo tiempo, estas propuestas han sido desarrolladas para su entorno específico, limitando su uso en nuestro escenario local.

2.3 Particularidades del escenario médico

Las aplicaciones médicas divergen de la definición estricta de WSN en varios aspectos. En primer lugar, y esto quizás sea lo más importante, todos los nodos son vitales para el aplicación. Esto significa que no se puede admitir la pérdida de un nodo aunque la red global siga siendo operativa. Un nodo averiado tendrá que ser sustituido. En segundo lugar, el tiempo es esencial, mientras que un paquete de datos en una WSN estándar puede emplear un tiempo indeterminado desde su origen hasta su destino, en una aplicación médica de emergencia requerirá frecuentemente límites rigurosos en lo que se refiere en el tiempo máximo de demora permitida.

La fiabilidad es un tercer parámetro de interés. Hay varias formas de aumentar la probabilidad de que un mensaje llegue a su destino, una forma posible es aumentar la redundancia, lo que puede hacerse de varias maneras, transmitiendo el mensaje por diferentes caminos (diversidad de espacio), o por diferentes frecuencias (diversidad de frecuencias), o varias veces en la misma frecuencia (diversidad de tiempos) o, incluso, se puede enviar utilizando diferentes esquemas de modulación (diversidad de esquemas de modulación). Este último es un método complejo que sólo se empleará cuando los requisitos sean extremadamente estrictos y el costo no sea problema.

Adicionalmente, se requiere la verificación del nivel de radiación electromagnética del entorno tal que esta no supera la relativa a la exposición del cuerpo humano [57]. La normativa europea aplicable relativa a Redes de Área Local inalámbrica es la ETS 300 328 del ETSI [58]. Según esta norma, la comprobación de la conformidad se llevan a cabo por medio de medidas de: parámetros de los transmisores, potencia radiada efectiva, rango de frecuencias de funcionamiento del equipo, parámetros de los receptores, entre otros.

2.4 Situaciones médicas críticas en una emergencia

Los sistemas respiratorio y circulatorio están íntimamente ligados en cuanto a la supervivencia de un individuo se refiere. A continuación se presentan algunos de los problemas que se pueden presentar en una situación de emergencia así como los tiempos máximos que tiene el personal médico para socorrer a una persona.

Paro respiratorio: es una emergencia que compromete la vida del paciente. El tratamiento de este problema debe ser prioritario y requiere de acción inmediata. Ya que una falla de la respiración por un período de 4 a 6 minutos, conlleva a un daño irreversible a las células del cerebro. El daño cardíaco ocurre poco después del paro respiratorio, debido a que se acaba rápidamente el oxígeno en el torrente sanguíneo. En la tabla 6, se presenta los valores y posibles daños para el cerebro después de un paro respiratorio [59].

Tabla 6 Consecuencias de un paro respiratorio a través del tiempo

TIEMPO (MIN)	CONSECUENCIAS
0-4	Daño cerebral poco probable, paro cardíaco y respiratorio
4-6	Probable daño cerebral, muerte clínica
6-10	Probable daño cerebral, daño cerebral irreversible
Más de 10	Daño cerebral siempre presente, muerte biológica probable.

Falla en la circulación de la sangre: el paro cardíaco, un ataque cardíaco severo, una pérdida severa de sangre (ejemplo: hemorragia externa masiva), lleva a una falla en el flujo sanguíneo, con una alza de dióxido de carbono que en una primera etapa estimula el centro respiratorio pero que puede dañarlo eventualmente llevando a un paro respiratorio luego de tres o cuatro minutos. Una adecuada terapia debe contemplar el uso combinado de respiración artificial con masaje cardíaco, y debe procurarse atención médica de inmediato.

En los casos mencionados anteriormente se suele acudir a la reanimación cardiopulmonar (RCP), o reanimación cardiorrespiratoria (RCR), o en inglés Cardio-pulmonary resuscitation (CPR), la cual es un conjunto de maniobras destinadas a asegurar la oxigenación de los órganos cuando la circulación de la sangre de una persona se detiene (paro cardiocirculatorio). Iniciar las tareas de reanimación antes de 4 minutos resulta clave para la supervivencia del paciente. De hecho, cada minuto de retraso disminuyen entre un 8% y un 10% las posibilidades de supervivencia, y pasados 10 minutos, los intentos de reanimación no suelen tener éxito [60] [61].

2.5 WSN MERIS

MERIS fue concebido como una herramienta para la clasificación rápida y constante de las víctimas de una catástrofe humanitaria, donde el número de pacientes es mayor que la capacidad del personal de socorro. Para identificar cuáles de los signos vitales son importantes en una situación de alto riesgo y cuáles son utilizados en el proceso de clasificación de pacientes, se realizó una encuesta a los organismos de socorro seccional Cauca: Defensa Civil, Cruz Roja y el Cuerpo de Bomberos, esta actividad contó con un número de encuestados de seis, siete y seis personas respectivamente, las cuales hacen parte de los grupos en atención prehospitalaria para cada uno de los organismos. Estas entidades fueron seleccionadas debido a su amplio conocimiento teórico-práctico en el campo prehospitalario y el manejo de situaciones que involucran víctimas masivas.

La encuesta [62] consta de 30 preguntas divididas en tres grupos: el primero **manejo de una emergencia** permitió visualizar cómo las organizaciones de socorro asumen una situación de emergencia en relación al número de personas que acuden, su capacitación, tipos de emergencia que manejan, el área de cobertura de la entidad, y los pasos que siguen para la atención de un grupo de víctimas; el segundo **criterios de clasificación de víctimas** permitió identificar el método de clasificación implementado por cada una de las instituciones en una emergencia con víctimas masivas, los signos vitales prioritarios y sus relaciones; el tercero **características del dispositivo sensor** recopiló las opiniones y sugerencias en el diseño del dispositivo que medirá constantemente los signos vitales. Al analizar la encuesta se obtuvo que:

- El método de clasificación y priorización de víctimas en una situación de emergencia más empleado por las entidades de socorro es el *triage*, porque este permite clasificar y priorizar las víctimas en poco tiempo, al igual que administrar los recursos disponibles de una forma adecuada. No obstante, el Cuerpo de Bomberos divide este en *triage* START y *triage* prehospitalario.

El *triage*, proviene del francés TRIERE, que significa priorizar, categorizar, seleccionar [59], se usa como un método para tratar con accidentes múltiples en los que el número de pacientes excede la capacidad inmediata de los recursos. Se consolida como un sistema eficaz de ordenación del trabajo asistencial, para dar

respuesta inmediata a la demanda masificada, facilitando el trabajo del personal y disminuyendo la ansiedad de los enfermos y familiares ante la espera [63]. Su objetivo es asegurar la supervivencia del mayor número posible de pacientes lesionados dadas las circunstancias y los recursos disponibles. Dando como resultado prioridad máxima a pacientes que vivirán solo si son tratados y prioridad mínima a pacientes que vivirán aún sin tratamiento, o que morirán aún con tratamiento. Las reglas usuales para salvar vidas en forma diaria no se aplican a un accidente colectivo. Todos los sistemas de clasificación de pacientes que han sido desarrollados emplean el código internacional de colores que divide a los pacientes en cuatro categorías basadas en la necesidad de cuidados y la probabilidad de supervivencia de estos [64]. La tabla 7 resume el código internacional de colores.

Tabla 7 Código internacional de colores

COLOR (Prioridad)	DEFINICIÓN	EJEMPLO
Rojo (1)	Pacientes críticos potencialmente recuperables, que requieren atención inmediata por una urgencia que supone un riesgo inminente para la vida.	Pacientes con compromiso de la vía aérea o hemorragia externa.
Amarillo (2)	Pacientes graves pero sin riesgo vital inmediato, que requieren atención médica mediata.	Los pacientes con fracturas de huesos largos
Verde (3)	Pacientes con lesiones leves no urgente cuya atención puede demorarse.	Pacientes quienes incluso puede ayudar a confortar o ayudar a otros pacientes
Negro (0)	Pacientes con lesiones mortales o fallecidos en el lugar	Cualquier paciente que no responda, sin pulso, y sin respiración.

Por otra parte, hay que tener en cuenta que en la zona de rescate se acepta como norma general que en la primera clasificación o el primer *triage*, el tiempo máximo para clasificar a una víctima fatal no debe superar los 30 segundos, 1 minuto para una víctima verde y 3 minutos para una víctima grave (rojo) [65].

- El método de clasificación por etiquetas es limitado por cuanto no permite definir una prioridad dentro de los pacientes de una misma categoría.
- El 66.7% de las personas encuestadas en la Defensa Civil, el 28.6% de la Cruz Roja y el 50% del Cuerpo de Bomberos no actualiza las etiqueta de un paciente durante el tiempo que dura su atención.
- La monitorización de los pacientes pasa por dos etapas: primero, la valoración inicial en la cual se realiza una evaluación general a cada víctima para designar su prioridad de atención, el uso de medios materiales y humanos, así como la evacuación de acuerdo con la gravedad de cada una; segundo, la monitorización constante que se debe seguir del paciente hasta que se remite al centro hospitalario adecuado, convirtiéndose en tareas rutinarias y de alto costo en tiempo.
- Se considera que la frecuencia respiratoria (FR) y la frecuencia cardiaca (FC) son los signos vitales más significativos en la clasificación de los pacientes, dado que todos los encuestados consideraron en escala 1-10: (1) que la frecuencia respiratoria tiene una ponderación de diez, (2) la mitad asigno a la frecuencia

cardíaca un nueve, (3) el 33 % no considera a la temperatura en el proceso de valoración pero el mismo porcentaje le da una ponderación de cinco dado que esta se realiza por medio del contacto físico con el paciente, (4) el 33 % no considera a la presión arterial como un indicador clínico utilizado en la clasificación de los pacientes.

- Después de la valoración inicial del paciente, el tiempo entre valoraciones depende del tipo de protocolo *triage* implementado. Es así, como en el *triage* prehospitalario se valora al paciente cada 5 o 10 minutos, mientras que el *triage* START es un procedimiento que no se repite.

Teniendo en cuenta los resultados e información descrita hasta el momento en esta monografía, MERIS tiene por responsabilidad: **monitorear en intervalos de tiempo regulares (establecidos según criterios médicos), la frecuencia cardíaca y la frecuencia respiratoria de un grupo de pacientes geográficamente dispersos, y procesar estos valores para clasificar al paciente a través del código internacional de colores [64] para luego transmitir esta información oportunamente al personal de socorro correspondiente.** Para lo cual, se propuso el uso de una WSN con *Arquitectura por Rangos de Cobertura* como se ilustra en la figura 8. El número de saltos elegidos fue de dos porque con este valor se tiene un área de cobertura de aproximadamente 70 metros de radio (valor encontrado a través de la prueba 3 descrita en el capítulo 5) que es suficiente para cubrir una situación de emergencia para un equipo de socorristas.

En la figura 8, también se puede visualizar cuatro tipos de entidades: el Nodo Sensor, el Nodo Gateway, la Estación Base y la Estación Móvil. A continuación, se describe cada una:

- **Nodo Sensor** encargado de muestrear, procesar y enviar los valores de los signos vitales objetivos y la condición estimada del paciente reflejada por un de los códigos de color a la estación base a través del protocolo *ZigBee*.
- **Nodo Gateway** es un nodo encargado de servir como puente entre la estación base y la WSN.
- **Estación Base** es una estación de cómputo que utiliza al **Nodo Gateway**, para conectarse con la WSN; su responsabilidad consiste en: centralizar la información recibida de los nodos sensores, proporcionar un mecanismo local de despliegue y transmitir por WiFi a la estación móvil la información de los pacientes.
- **Estación Móvil** conformada por una PDA (o un PC portátil) que lleva consigo alguno de los integrantes del personal médico que se encuentra junto a las víctimas y le permite visualizar la información de los pacientes.

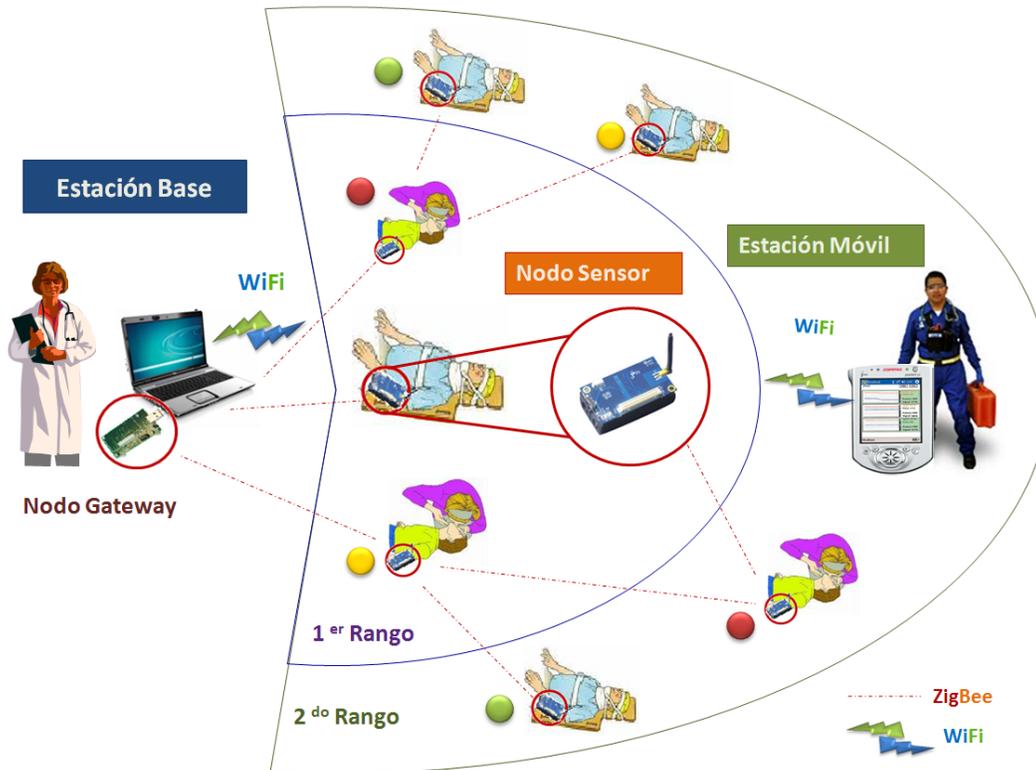


Fig. 8 Escenario MERIS

A continuación, se mencionan algunos requisitos tenidos en cuenta para el diseño e implementación del sistema MERIS:

- a. El tiempo de despliegue de la red no puede ser causal de retrasos para la atención de los pacientes, por tanto:
 - La ubicación de los sensores sobre el paciente debe ser intuitiva, rápida y efectiva.
 - La ubicación del nodo sobre el paciente no debiera influenciar en su correcto funcionamiento, dado que la tecnología WSN debería ser transparente para el personal médico y no debe ofrecer una sobrecarga cognitiva para este.
- b. A lo largo del tiempo de servicio de la red es común que los nodos se unan o dejen la red por circunstancias tales como: la atención de un nuevo paciente, su traslado o movilización por fuera del área de cobertura y fallas internas del nodo, entre otras. Sin embargo, se considera que una vez haya sido ubicado un nodo sobre el paciente el grado de movilidad de este es mínimo. De ello se deriva que:
 - Para brindar confiabilidad al servicio, es pertinente el desarrollo de un sistema de gestión central que administre el ingreso y salida de los nodos sobre la red. La información de gestión implica una sobrecarga de datos en la comunicación y con ello un sobre costo en la batería, por lo cual se debe realizar un balance entre complejidad y volumen de datos.

- Por otra parte, esta consideración favorece la implantación de algoritmos de localización de nodos que permiten la rápida ubicación de los pacientes.
- c. El consumo de potencia de los nodos debe ser óptimo para permitir su funcionamiento de forma autónoma y prolongada.
- Dado que la comunicación es la etapa que más consume energía dentro del nodo y que la manipulación del hardware de comunicación se escapa del alcance de esta investigación, se propone regular su consumo a través de la **cantidad y calidad de los datos que se transmitan**, sugiriendo un uso moderado del canal.
 - La capa de sensado también podría llegar a ser una etapa con consumo de potencia crítico, por tanto su diseño y construcción debe seguir criterios de bajo consumo, además debe planificarse eficientemente sus periodos de activación, es decir, los periodos de muestreo de las señales de interés.
- d. Teniendo en cuenta que MERIS está concebido para monitorear un grupo de pacientes dispersos en áreas de terreno extenso, es necesario que el sistema brinde mecanismos de localización de los nodos, para facilitar la ubicación de los pacientes que reporten estado de salud crítico.
- e. Durante una situación de emergencia, es posible que la WSN deba abarcar áreas de terreno que estén por fuera del alcance de las capacidades de comunicación directa entre los nodos y la estación base. Por tanto:
- Es pertinente **dar soporte a esquemas de comunicación multisalto**, en donde un nodo pueda servir de puente para la transmisión de datos de otro. Dichos esquemas son soportados dentro de arquitecturas por *rangos de cobertura*.
 - Los esquemas multisalto puede llegar a poner en riesgo el tiempo de autonomía del nodo puente y en consecuencia es adecuado **hacer seguimiento a dichos nodos** para prevenir su salida temprana de la red y la pérdida total del segmento con el cual se unía.
- f. Según criterios médicos, el tiempo límite para iniciar un proceso de reanimación ante un paro cardíaco o respiratorio, sin producir daños irreversibles sobre el paciente, es de **4 minutos**. Este tiempo debe considerar el desplazamiento del personal de socorro hasta el paciente y el inicio de la ejecución del procedimiento médico, por tanto es de vital importancia garantizar que los mensajes emitidos por cada uno de los Nodos durante el servicio, no sobrepasen plazos de tiempo conocidos que permitan brindar una atención oportuna. Por tanto se requiere:
- Definir el tiempo máximo que tienen los mensajes generados en la red para llegar a la estación base, el cual debe ser un valor adecuado para que no se ponga en riesgo la vida de una persona.
 - Soportar comunicación en Tiempo Real entre la estación base y cada nodo de la red MERIS.

- g. Todos los nodos de la red son importantes por cuanto cada uno representa a una persona con un potencial estado de salud crítico. Sin embargo, los nodos se clasificarán teniendo en cuenta la estimación del estado de salud del paciente al cual se encuentran unidos. Lo cual implica que:
 - El acceso al medio de comunicaciones dependerá de la clasificación que se ha estimado para el paciente.
 - Definir diferentes plazos a los mensajes dependiendo de su categoría.
- h. La red MERIS, está dirigida a las diferentes entidades de salud, más precisamente a los cuerpos médicos de emergencia. Es pertinente, por tanto que:
 - Su fabricación resulte económica dado que el número de nodos requeridos para una situación de emergencia es potencialmente elevado.
 - Involucrar a las entidades de socorro durante todo el proceso de desarrollo.
 - Todos los elementos seleccionados para la fabricación de la capa de sensado deben ser no solamente económicos sino de fácil adquisición para soportar las operaciones de mantenimiento que garanticen la calidad del servicio.

2.6 Resumen

A continuación, se presenta en la figura 9 un diagrama que resume los conceptos tratados en este capítulo, en forma de mapa mental.

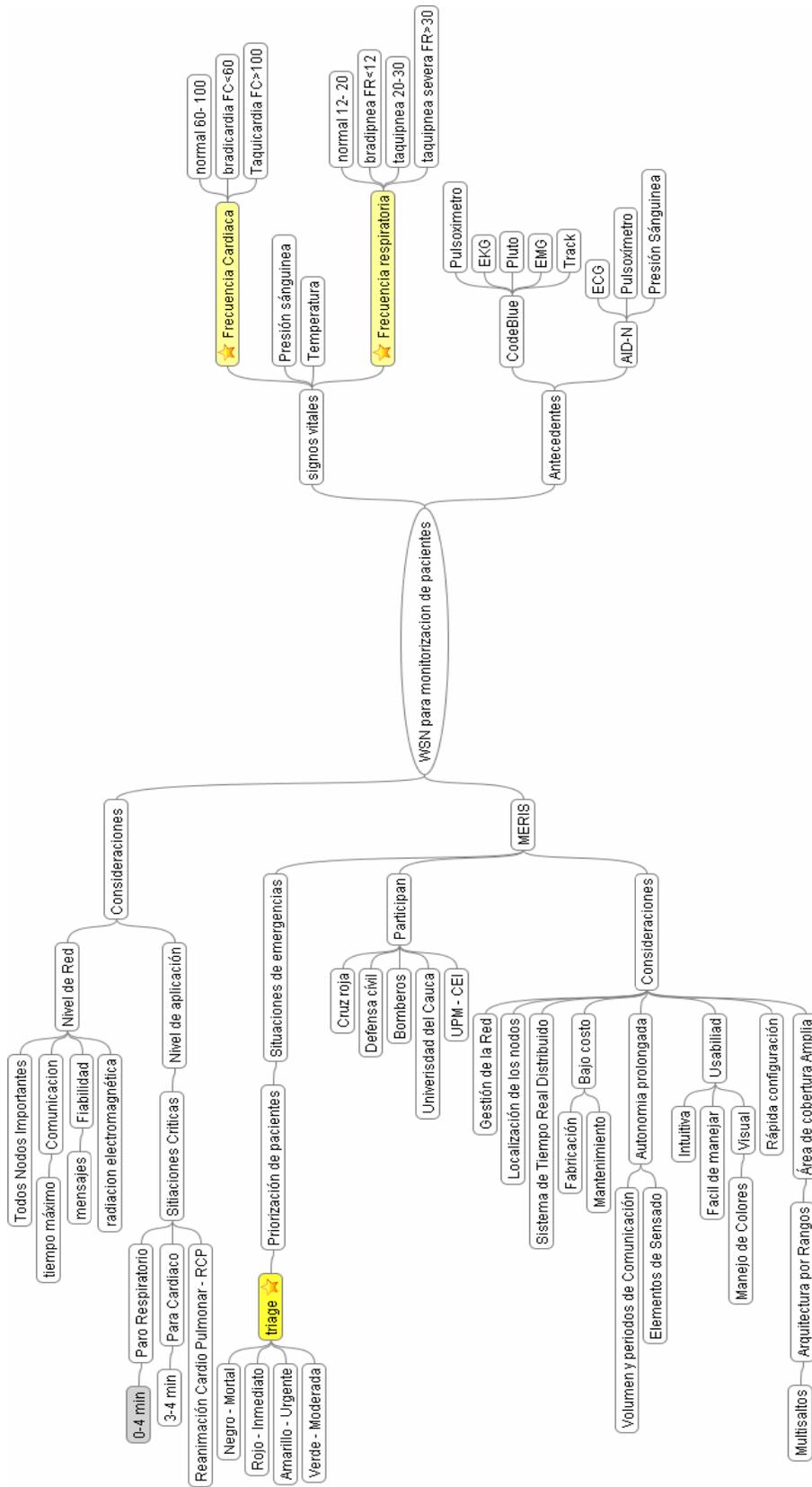


Fig. 9 Mapa conceptual, capítulo II

CAPÍTULO 3 CARACTERIZACIÓN DE MERIS COMO UN SISTEMA DE TIEMPO REAL

La caracterización de los procesos de comunicación en MERIS desde la perspectiva de tiempo real está justificada porque los errores cometidos, tanto en el resultado de los cálculos como en el tiempo de respuesta, suponen un riesgo para las personas con posible estado de salud crítico que están siendo monitoreadas por la red. El soporte de tiempo real (RT, *Real Time*) para la red MERIS que se propone en este trabajo de maestría, está orientado a la comunicación entre la estación base y el nodo sensor, dado que según criterios médicos en promedio una persona puede reaccionar favorablemente a un proceso de reanimación dentro de los 4 primeros minutos de iniciado dicho proceso, por lo cual un retardo en la comunicación podría producir daños irreversibles sobre el paciente, al brindar al personal de socorro información imprecisa o tardía de su estado real de salud.

Este capítulo, inicia con las generalidades de los STR, a continuación se analizan las diferentes estrategias empleadas en algunos proyectos relacionados con la integración de tiempo real a las WSN, luego se especifica la arquitectura propuesta para dar soporte a la comunicación en tiempo real sobre la red MERIS, finalmente se presenta algunos elementos de modelado del sistema MERIS.

3.1 Generalidades de los sistemas de tiempo real

Existe una gran variedad de definiciones de sistema de tiempo real aunque todas ellas coinciden en algo fundamental: la relevancia del tiempo de respuesta. Una definición ampliamente aceptada es la que define un STR como cualquier actividad o procesamiento de información que tiene que responder a un estímulo de entrada generado externamente (incluido el paso natural del tiempo), en un período finito y especificado [66], es decir, el funcionamiento correcto del sistema depende no sólo del resultado lógico de la computación, sino también del momento en el que se produce ese resultado, con lo cual se puede afirmar que tiempo real no es sinónimo de inmediatez, baja latencia o rapidez de funcionamiento, no es la velocidad de la respuesta del sistema la que lo convierte en un sistema de tiempo real sino la precisión de esta en el intervalo de tiempo definido.

El objetivo en los STR es asegurarse de que la latencia es la adecuada para resolver el problema al cual el sistema está dedicado, la cual puede ser de días, horas, segundos o microsegundos dependiendo del sistema, dado que no es lo mismo monitorizar el nivel de un depósito, que controlar la apertura de una compuerta, detectar una avería en la red o generar una factura [67].

Los STR poseen características tanto de sistemas reactivos como de control [68], un sistema reactivo interacciona en forma continua con su entorno, recibiendo estímulos y produciendo respuestas, además son indeterministas dado que el orden de los eventos es determinado por el entorno. Por otra parte, un sistema de control actúa sobre su entorno para obtener un comportamiento deseado, puede implementarse usando sistemas informáticos y ser de bucle abierto (sin sensores) o bucle cerrado (sensor-control-actuador). Un sistema empotrado es un STR que hace parte de un sistema más complejo, realiza funciones específicas de control y tiene limitaciones de tamaño, peso, y por ende de recursos (procesador, memoria, E/S), en algunas ocasiones puede poseer dispositivos especiales de entrada/salida. Las principales características de un STR son:

- Predictibilidad (determinismo): La cual implica que debe ser posible demostrar o comprobar *a priori* que los requerimientos de tiempos se cumplen en cualquier circunstancia con una cuidadosa planificación de tareas y recursos, es decir, cuando se activa una tarea, debe ser posible determinar con certeza cuándo completará su ejecución, aún cuando el sistema esté sobrecargado.
- Fiabilidad y seguridad, tolerancia a fallos. Preservar la mayor funcionalidad posible incluso cuando se producen fallos.
- Confiabilidad: si los componentes del sistema no son confiables, no se cumplen las restricciones temporales. La predictibilidad de un STR se establece bajo diferentes niveles de confiabilidad.
- Adaptabilidad: a corto plazo, cuando suceden cambios en el estado del sistema incluyendo sobrecargas y fallas, a mediano plazo cuando ocurren cambios en la configuración y a largo plazo cuando los cambios son en las especificaciones. Ya que si los plazos de las tareas se cumplen sólo bajo condiciones restringidas de estado/configuración, se compromete la confiabilidad y el rendimiento del sistema.
- Grados de Criticidad: el incumplimiento de un requisito temporal puede ser más crítico en una tarea que en otra.
- Concurrencia: los dispositivos externos funcionan al mismo tiempo; las tareas comparten recursos y compiten por ellos.

En los STR coexisten tareas periódicas y aperiódicas, con requisitos temporales y sin estos, y se clasifican así:

- Tiempo Real Críticos (*hard real-time*) en los cuales existe al menos una tarea para la que no se admite nunca una violación del plazo.
- Tiempo Real Flexible (*soft real-time*) donde pueden violarse algunos plazos a costa de la calidad del funcionamiento.
- Tiempo Real Firme (*firm real-time*) en los cuales se descartan las respuestas fuera de plazo.

De los tipos de STR mencionados, MERIS es considerado como un STR firme desde el punto de vista de la aplicación, dado que los paquetes de información que lleguen fuera del plazo se descartan, lo cual es posible porque la información de los signos vitales se envía con mayor frecuencia a la que físicamente puedan tener una variación significativa, además, con el paso del tiempo estos mensajes dejan de representar el estado de salud actual del paciente.

El dominio de aplicaciones de los STR es muy amplio y variable, en el cual se encuentran aplicaciones para: sistemas de telecomunicaciones, control automovilístico, servidores multimedia, sistemas de procesamiento de señal, sistemas de radar, electrónica de consumo, control de procesos, sistemas de manufactura automática, sistemas de control, supervisión y adquisición de datos (SCADA), control de tráfico aéreo, sistemas satelitales entre otros [69].

3.2 Proyectos relacionados

Para poder plantear de forma adecuada una estrategia al soporte de tiempo real en MERIS, fue necesario analizar algunas de las investigaciones más relevantes relacionadas con la implementación de mecanismos de soporte RT en el ámbito de las WSN, las cuales se presentan a continuación:

3.2.1 Implicit EDF: An Implicit Prioritized Access Protocol for WSN

Implicit EDF [70] es un protocolo para el soporte a la comunicación en tiempo real duro que implementa la política de planificación *Earliest Deadline First* (EDF) [71]. Dicha planificación se realiza off-line y a partir de ella se construye una tabla que posee información sobre las prioridades, deadline, períodos y duración de los mensajes, posibilitando la implementación de un esquema de comunicación libre de colisiones que aprovecha la periodicidad del tráfico. *Implicit* EDF realiza una programación EDF descentralizada de paquetes, lo cual se consigue replicando las tablas de planificación en cada uno de los nodos tal que cada uno de ellos puede determinar quién posee la prioridad en la transmisión haciendo una comparación del último mensaje recibido con la tabla.

El tiempo está dividido en franjas de igual tamaño, y todos los nodos están sincronizados sobre una misma base temporal. Durante una franja, solo se puede enviar un único paquete. Este esquema es apropiado cuando el tráfico es periódico y todos los periodos son conocidos, lo cual no es el caso de muchas de las aplicaciones para WSN.

Este enfoque no es adecuado para MERIS, dado que el esquema de planificación es estático, lo cual implica una definición *a priori* de la cantidad de nodos que conforman la red y el periodo de generación de paquetes, características que no se ajustan al escenario MERIS ya que durante el funcionamiento de la red los nodos pueden: entrar o salir de ella dependiendo de la evolución del estado de salud del paciente y generar mensajes con diferente periodo debido a que esta depende de la frecuencia de la señal medida.

3.2.2 RAP: A Real-Time Communication Architecture for Large-Scale Wireless Sensor Networks

RAP [72] es la propuesta de una arquitectura de comunicación en tiempo real suave para WSNs de gran escala y alta densidad, en donde se define el soporte a servicios de eventos y consultas de alto nivel en aplicaciones de microsensado. Su modelo de comunicaciones se sustenta en un esquema localización-dirección, lo cual significa que las direcciones de red están dadas por la ubicación del nodo; por tanto es indispensable la implicación de un servicio de localización como GPS o similares.

El manejo en tiempo real de la información se consigue mediante la modificación del protocolo de la capa MAC en donde se planifican los paquetes siguiendo una política denominada *Velocity Monotonic Scheduling* (VMS) en la cual se asigna un valor de prioridad tomando en cuenta las restricciones tanto de tiempo como distancia de los mensajes. Ser consciente de dichas restricciones implica que entre mayor sea la distancia que un paquete deba recorrer y/o menor su *deadline*, mayor debe ser su prioridad para garantizar los plazos de entrega. La relación entre distancia y tiempo define la *Velocidad* o prioridad local del paquete, lo cual resulta en una medida adecuada de la urgencia local [72].

Los cambios sobre el protocolo MAC consisten básicamente en involucrar el parámetro de Velocidad durante la definición tanto de los tiempos de espera durante la resolución de colisiones como del ancho de banda para el canal de contención. Por otra parte, los servicios de consulta y eventos de alto nivel hacen parte de las responsabilidades asignada a la estación base por ser esta la entidad sobre la cual se replican todos los eventos e información de la red.

Involucrar la distancia y el plazo, como criterios para determinar la prioridad de los mensajes resulta en un tratamiento más consciente de la urgencia con que deben ser tratados que definir un valor estático de prioridad, sin embargo esta propuesta no realiza esfuerzos para determinar una ruta óptima para continuar la propagación del mensaje, además su acogida implica el uso de un sistema de localización confiable, que por requerimientos de costo en MERIS no puede apoyarse sobre hardware externo tal como un GPS. Por tanto, se debe evaluar el costo energético y la complejidad del desarrollo de un sistema de localización propio. Por otra parte, este enfoque ha sido desarrollado para redes de gran escala en donde existe un real aprovechamiento de las decisiones de priorización basadas en la velocidad de paquete y por tanto en una topología en estrella o de unos saltos su impacto sería bajo.

3.2.3 SPEED: A real-time routing protocol for sensor networks.

SPEED [73] es un protocolo de comunicación en tiempo real suave que soporta servicios de propagación *unicast*, *multicast* y *anycast*; este último consiste en el envío de paquetes hacia una región geográfica particular. Mediante el uso de técnicas de control realimentado (Feedback Control, FC), determina rutas alternativas en caso de congestión y un esquema de prioridades en la capa MAC, asegura la entrega a tiempo de los paquetes. Además, involucra la localización geográfica dentro de las decisiones de enrutamiento mediante el protocolo no determinístico, llamado Seguimiento Geográfico [74] (Geographic Forward, GF). La utilización del protocolo GF permite el envío de información sin el conocimiento previo de la topología de red global, lo cual resulta apropiado para las redes de sensores de gran escala.

Al igual que RAP, SPEED tiene en cuenta las restricciones de tiempo y distancia pero desde una perspectiva distinta: para un nodo, la distancia se determina como la separación con su vecino y el tiempo como el retardo promedio del salto; a dicha relación se ha denominado *SPEED*. Cada nodo calcula y mantiene los *SPEED* de las rutas y evalúa el progreso de los paquetes en función de un nivel mínimo de referencia denominada *SetSpeed*, el cual se utiliza como criterio para la selección de la ruta adecuada. Cuando un nodo no encuentra un ruta que supere el valor umbral entonces se descarta el mensaje, por tanto, en tiempo de diseño se debe programar un valor de *SetSpeed* que garantice probabilísticamente que al menos una ruta cumpla con este criterio.

SPEED solo garantiza una velocidad en toda la red, lo cual no es adecuado para escenarios de tráfico con requerimientos de plazo diversos. Finalmente, el control realimentado se refleja en los paquetes que un nodo envía a su predecesor para evitar que la ruta llegué a congestionarse.

Al igual que RAP, SPEED es adecuado para redes de gran escala y alta densidad. Su implementación también implica la utilización de un sistema de localización así como un aumento considerable de mensajes entre los nodos para determinar la separación entre estos y el retardo del enlace. Lo cual afecta considerablemente el consumo de potencia de los nodos.

3.2.4 MMSPEED: Multipath Multi-SPEED protocol for QoS guarantee of reliability and Timeliness in wireless sensor networks

MMSPEED (Múltiples rutas Múltiples SPEED) [75] es una extensión del protocolo SPEED y se define como un protocolo de enrutamiento múltiple-trayectoria y multi-velocidad que garantiza QoS en redes inalámbricas de sensores. Por cada velocidad se ofrece un nivel de QoS y un conjunto de rutas adicionales que pueden mejorar la calidad del tráfico, además, permite el envío de paquetes teniendo en cuenta el retardo extremo a extremo requerido por las aplicaciones con el fin de evitar congestión y reducir la tasa de pérdida de paquetes. MMSPEED ofrece interoperabilidad con la capa MAC IEEE 802.11e por medio del protocolo EDCF (*Enhanced Distributed Coordination Function*) [76].

En MMSPEED la QoS es tratada desde dos ámbitos: la puntualidad y la fiabilidad. La puntualidad se garantiza a través del manejo de la información propuesto por SPEED pero adicionalmente soportando distintos *SetSpeed* (valores de referencia para la velocidad de paquete) aplicables a distintos tipos de tráfico. La fiabilidad es el resultado del soporte a multitrayectos que duplica el envío de paquetes a través de varias rutas ofreciendo una garantía probabilística de la recepción de los mensajes. Para determinar el próximo nodo de un paquete, MMSPEED tiene en cuenta la pérdida de tramas en cada enlace con los nodos vecinos, lo cual se obtiene directamente de la capa de enlace.

Estos mecanismos de aprovisionamiento de QoS se realizan basados en la ubicación geográfica de los nodos de la red, sin información global de la red, lo cual favorece la transmisión con compensación dinámica, es decir, compensar las decisiones locales inexactas mientras que el paquete viaja hacia su destino. Esto aumenta la auto-adaptabilidad del protocolo a los cambios dinámicos de la topología de red. Además, es adecuado para los patrones de tráfico periódico y aperiódico, ya que las decisiones de enrutamiento se toman únicamente basadas en información local.

En [77] se presenta una modificación de MMSPEED denominado MMSPEED_CWA, el cual implementa el mecanismo de Adaptación de la Ventana de Contención (CWA) para reducir el número de colisiones. MMSPEED_CWA no cambia la capa de red, pero si cambia la capa MAC mediante la introducción del mecanismo CWA en vez del mecanismo clásico del protocolo EDCA [78] para el manejo de la ventana de contención. Con lo cual se modifican dinámicamente el rango de la ventana a la mitad, el doble, el cuádruple o el mismo valor dependiendo del nivel de congestión de la red. Como conclusión se menciona que el mecanismo CWA mejora tanto la entrega de paquetes como la medida del retardo extremo a extremo, sin embargo se plantea como trabajo futuro la optimización del consumo de potencia del protocolo.

La utilización de MMSPEED para MERIS no es adecuada dado que el aumento de la fiabilidad de la red a través de la duplicidad de los mensajes por diferentes rutas representa un alto costo a nivel de consumo de potencia para la red, además MMSPEED resulta más adecuado para aplicaciones donde el volumen de tráfico es considerable e implica un enfoque orientado a flujos de datos.

3.2.5 RPAR: Real-time Power-Aware Routing in Sensor Networks

RPAR [79] es un protocolo de comunicaciones en tiempo real para entornos WSN donde los mecanismos de adaptación dinámica de la potencia de transmisión y la toma de decisiones de enrutamiento basada en los plazos de los paquetes, son utilizados para

controlar la latencia en la comunicación. Este protocolo parte de la estrecha relación que existe entre potencia y calidad en la comunicación, ratificada a través de pruebas realizadas sobre los nodos MICA2 con radio CC1000 de Chipcon, en donde se concluyó que la variación en la potencia de transmisión puede ser una estrategia eficaz para controlar los retardos en la comunicación [79]. No obstante, este incremento en la potencia, reduce el rendimiento de la WSN porque aumenta el canal de contención y genera mayor interferencia. Por tanto, su uso solo es adecuado para aplicaciones de tiempo real donde el cumplimiento de los plazos de paquete es más importante que el rendimiento total de la red, lo cual no es el caso de MERIS.

Además, RPAR requiere que cada nodo de la red sea estático y se conozca su ubicación exacta, bien sea a través de GPS u otros servicios de localización, por cuanto utiliza Políticas de Asignación Dinámica de Velocidad [72] para los paquetes.

3.2.6 A Real-Time Communication Framework for Wireless Sensor-Actuator Networks

En esta investigación se plantean estrategias para mitigar la latencia en la comunicación entre sensores y actuadores en una WSN (*Wireless sensor-actuator network*) sin control centralizado donde los sensores estáticos reportan a los actuadores con movilidad limitada, solamente cuando sus valores de sensado se encuentran en el rango de interés [80]. Este enfoque es apropiado para aplicaciones orientadas a eventos, tales como detección de fuego, fugas de gas e intrusos.

Este *framework* para la comunicación en tiempo real se basa en dos algoritmos: El primero para el envío de información de eventos desde los sensores a los actuadores con mínima latencia mediante dos mecanismos: uno es la priorización de la información, es decir, los datos se transmiten en un orden especial, de tal manera que los más importantes se envían en primer lugar por ejemplo tipo de evento, localización y tiempo, esto garantiza que los actuadores pueden obtener una imagen aproximada sobre el caso dentro de un tiempo corto, con lo cual pueden iniciar coordinación sin esperar la llegada de toda la información y otro dividiendo el área donde ocurre el evento en partes más pequeñas. El segundo, un algoritmo de coordinación que permite a múltiples actuadores compartir su información del evento para tomar decisiones sobre las acciones que se requieren tan pronto como sea posible.

En esta investigación se evidencia la importancia de extraer las características más relevantes de un bloque de datos tal que, con unos pocos criterios se puedan tomar decisiones con el fin de favorecer una actuación temprana además de contar con una reducción del consumo de potencia al transmitir un menor volumen de datos, para MERIS el valor de la clasificación del paciente resultado del *triage* es el valor que abstrae el bloque de datos a transmitir. Por otra parte, desarrollar un algoritmo de coordinación entre nodos no es pertinente para MERIS dado que no existe correlación entre la información que genera un nodo y otro.

3.2.7 PA-EDF: Power Aware EDF, Real-time Support for Wireless Sensor Networks

Dado que en WSN el consumo de potencia es uno de los factores más importantes para el diseño de la arquitectura del sistema, [81] propone un algoritmo para la planificación de tareas que favorece el bajo consumo de potencia teniendo en cuenta la prioridad y nivel de energía del nodo. Bajo una deficiencia de potencia, no todas las tareas tienen igual

importancia, por lo que resulta adecuado ajustar la frecuencia y el plazo de ejecución de la tarea teniendo en cuenta el nivel de potencia actual del nodo.

A cada tarea se le asigna un Índice de Potencia (*Power Index*, PI) con el cual se mide la relevancia de su ejecución para un nivel de potencia dado. Si bien este procedimiento no afecta el consumo de potencia de la tarea, disminuye el consumo promedio de la red prolongando así su autonomía.

Para su implementación se han propuesto dos aproximaciones: (1) PA-EDF (*Power Aware EDF*), donde si el nivel de energía del nodo es superior al PI de la tarea, ésta se programa siguiendo los criterios normales de EDF (*Earliest Deadline First* [71]). Por el contrario, si el PI es mayor, el sistema descarta su planificación pero envía una señal de realimentación que dispara un procedimiento interno en el cual se podría modificar su frecuencia de ejecución y PI, logrando que a menor nivel de potencia menor frecuencia en las tareas y/o descarte de tareas secundarias. (2) APA-EDF (*Adaptive PA-EDF*) el algoritmo adapta de forma más completa la frecuencia de ejecución y el PI de la tarea al nivel de potencia del sensor, creando distintos niveles de umbral que permiten un manejo de la importancia relativa entre ellas.

Según el contexto descrito en el capítulo 2, para el sistema MERIS no es adecuado descartar la ejecución de algunas de las tareas relacionadas con el monitoreo de los signos vitales, debido a que estas proveen los criterios para realizar la clasificación del paciente, sin embargo modificar sus periodos de ejecución podría ser una estrategia viable para disminuir el consumo de potencia cuando el paciente ha sido clasificado como estable.

3.2.8 Otros antecedentes

ERIKA and OpenZB: *An implementation for realtime wireless networking*, se limita a la implementación de la pila de protocolos 802.15.4 sobre ERIKA, un sistema operativo de tiempo real para sistemas embebidos [82], que según pruebas realizadas utilizando una plataforma FLEX junto con un módulo de radio CC2420, resulta proveer un buen desempeño en la comunicación medido a través de los tiempos de retardo, pero hasta el momento no se tiene soporte multisalto.

Real-time, Bandwidth, and Energy Efficient IEEE 802.15.4 for Medical Applications [83] plantea que en las aplicaciones médicas hay dos tipos de flujos: (1) los periódicos, los cuales se asocian con funciones de monitoreo y no presentan restricciones de tiempo considerables y (2) los aperiódicos, que se utilizan para la notificación de eventos tales como alarmas médicas, y por tanto demandan un manejo crítico de su latencia y confiabilidad. Además, propone que para escenarios de aplicaciones médicas, la combinación de una topología en estrella, con soporte a mecanismos de sincronización basada en *beacons* y una modulación O-QPSK es lo más adecuado. También asegura que el estándar 802.15.4 no cumple con los requerimientos esenciales para este tipo de aplicaciones y propone una modificación basada en el soporte al envío priorizado de información mediante el uso de los GTS (*Guaranteed Time Slot*), segmentos de trama reservados para el envío priorizado de información en aplicaciones con requerimientos de tiempo. Sin embargo, esta propuesta se queda corta a la hora de plantear una estrategia a nivel de red para manejar paquetes con prioridad, ya que no propone ningún control sobre el uso que se le da a los GTS.

Para MERIS se propone un manejo de información independiente del protocolo de comunicaciones, tal que pueda ser replicado en otros estándares. No se descarta el empleo de GTS como mecanismo final para la implementación de la estrategia. Por otra parte, se debe considerar que la propagación periódica de información asociada con funciones de monitoreo si demanda requerimientos puntuales de latencia por cuanto resulta en un mecanismo eficaz para mantener la confiabilidad del sistema.

3.3 Arquitectura de comunicación para MERIS

En esta sección se definen los componentes y políticas esenciales de la arquitectura de comunicación propuesta para MERIS, los cuales procuran el manejo eficiente y oportuno de la información definido a partir de su tiempo de vigencia o plazo. Estos componentes dan soporte a un protocolo de iniciación, un algoritmo de enrutamiento de paquetes, la priorización de mensajes y la extracción de características de información. Para su definición se tuvo en cuenta en primera instancia las estrategias utilizadas para el aprovisionamiento de tiempo real en WSN según los referentes encontrados, las cuales se resumen en cuatro:

- a. Implementación de políticas de planeación de Velocidad Monotónica (*Velocity Monotonic Scheduling*), la cual parte de que la localización de los nodos es conocida.
- b. Extracción de características, la cual permite minimizar el volumen de información necesaria para la toma de decisiones, habilitar servicios de consulta sobre la red para recuperar información detallada cuando se requiera y análisis cooperativo de la información.
- c. Inclusión del Plazo (*Deadline*) de los Paquetes como criterio para el enrutamiento y priorización de mensajes.
- d. Implementación de teorías de Control basado en Software, por ejemplo algoritmos de control realimentados como SPEED.

De las anteriores estrategias, la A y la D se descartaron por demandar de un sistema de localización confiable además de generar un aumento considerable de mensajes entre los nodos para determinar la separación entre estos y la latencia del enlace; la B y la C se utilizaron pero con algunas variaciones por ejemplo se adicionaron más criterios para la selección de rutas y priorización de paquetes. Por otra parte, se han tenido en cuenta las siguientes premisas:

- La secuencia de la información es vital para garantizar una lectura correcta de los datos, por lo cual todo paquete de información debe incluir un identificador de secuencia o una estampa de tiempo y tiempo de caducidad denominado plazo (D), que permita verificar la vigencia de la información. En el caso, de que no se cumplan los plazos de llegada a la estación base, los paquetes que aún están dentro de la red serán descartados.
- Se considera que dentro de la red MERIS solo se tendrán comunicaciones síncronas, es decir, que los nodos solo podrán enviar información cuando se les solicite. Esta condición involucra la sincronización de todos los nodos, función realizada por la *Gateway*.
- Existen tres tipos de paquetes de información que circulan por la red, establecidos por la clasificación del paciente, por lo cual se definen diferentes requerimientos en

términos de plazos para cada uno, en busca de garantizar que la información de los pacientes clasificados como críticos tengan mayor prioridad a la hora de enviar su información a través de la red.

- Finalmente, teniendo en cuenta las restricciones en recursos que cuentan los nodos de una WSN, las estrategias propuestas debe introducir el mínimo de encabezados en términos de comunicaciones y considerar el bajo consumo de energía.

En la figura 10, se puede visualizar las distintas entidades presentes en la WSN de acuerdo al rol que desempeñan en esta, además se muestran los posibles canales de comunicación entre ellas. A continuación se describe la funcionalidad que cumple cada entidad.

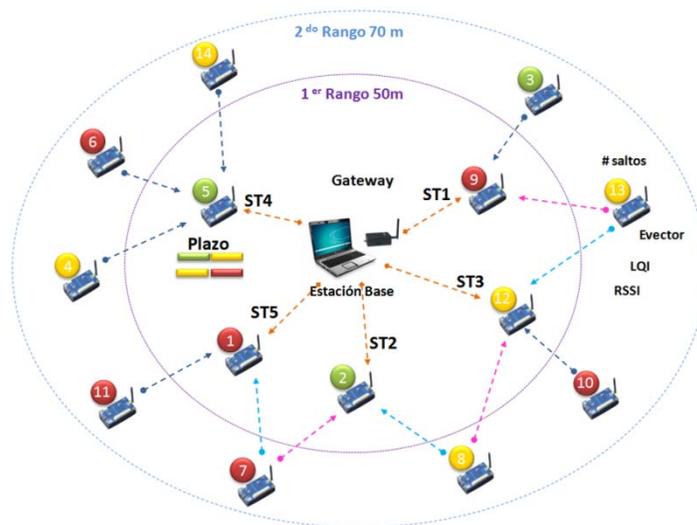


Fig. 10 Diagrama de contexto del esquema de comunicación en RT para MERIS

- **Estación base:** entidad encargada de desplegar la información referente a los datos de la aplicación MERIS (FR, FC, SaO2 y clasificación) y la topología de la red en árbol.
- **Nodo Gateway:** nodo encargado de: (1) la sincronización la red a través de *Becons*, (2) la recolección de la información de todos los nodos de la WSN, (3) la asignación de los Slots de Tiempo (ST) para los nodos de primer rango y (4) mantener un registro de nodos de primer rango activos en la red en la tabla de vecinos.
- **Nodo de primer rango o nodo Puente:** cumple las siguientes funcionalidades: (1) envía los mensajes de datos a la *Gateway* en su ST, (2) sirve como nodo puente para los nodos de segundo rango, (3) mantiene la tabla de vecinos tanto de los nodos de primero como de segundo rango y (4) decide que mensaje debe ser enviado primero de la cola de mensajes teniendo en cuenta los criterios de tiempo de vida del paquete en la red y prioridad del mismo; la cola de mensajes contiene tanto los paquetes propios del nodo como de los nodos de segundo rango relacionados a él, es decir, que lo han adoptado como puente o padre.

- **Nodo de segundo rango o nodo:** encargado de: (1) enviar su información de datos a los nodos de primer rango, (2) mantener la tabla de vecinos y (3) seleccionar un nodo del primer rango como puente o padre teniendo en cuenta los siguientes criterios: número de saltos al nodo *Gateway*, contador de mensajes recibidos por un nodo denominado *Evictor* [84], el cual indica el grado de presencia del nodo en la red, Indicador de Calidad del Enlace denominado LQI y el Indicador de Fuerza de la Señal Recibida llamado RSSI.

A continuación se describe la estructura de las tramas que circulan en la red.

3.3.1 Estructuras de trama

En esta sección se especifican las dos estructuras de trama que circularan en el WSN: trama *beacon* y trama de datos, las cuales se insertan dentro del MSDU de la trama MAC figura 14.



Fig. 11 Estructuras de trama

Los campos de la trama *Beacon* son:

- Número mágico: evita que un nodo repita infinitamente un mensaje *beacon*.
- Número de saltos: indica el número de nodos por los cuales paso el mensaje.
- Estampa de tiempo: es el tiempo local de la *Gateway*.
- Dirección: identificador del nodo al cual le va a asignar un ST.
- Porcentaje inicio: indica el porcentaje de inicio del periodo de transmisión del nodo de acuerdo al tamaño de periodo de activación de la supertrama.
- Porcentaje final: representa la cantidad de tiempo del periodo de actividad en el cual el nodo puede transmitir.

La trama de datos contiene los siguientes campos:

- SaO: valor de la saturación de oxígeno del paciente relacionado al nodo.
- FC: valor de la frecuencia cardíaca del paciente relacionado al nodo.
- FR: valor de la frecuencia respiratoria del paciente relacionado al nodo.
- Triage: valor de la clasificación estimada al paciente.
- Prioridad: valor de la prioridad del mensaje, el cual puede ser alta, media o baja.
- Estampa de tiempo: tiempo local del nodo origen del mensaje.
- Fuente: identificador del nodo origen.
- Destino: identificador del nodo destino.

A continuación se detallan cada una de las políticas propuestas.

3.3.2 Manejo de la información, extracción de características

La extracción de la información es una estrategia para minimizar el consumo de potencia del nodo desde el punto de vista de la cantidad de bits a transmitir, partiendo de que se estima que en un nodo, la transmisión de un *bit* puede ser hasta mil veces más costosa en términos de potencia, que su procesamiento y/o almacenamiento. Por lo cual se propone segmentar la información por rangos, por ejemplo, para enviar la información de la FC que toma valores entre 0 y 220 ppm se requiere de un byte, sin embargo, si se divide el rango de valores en 16 sub-intervalos se podrá utilizar solo 4 bits para representar la misma información. En una situación más crítica a nivel de batería, se puede enviar sólo las variaciones desde el último valor completo, es decir codificación delta. De hecho, si la situación se complica aún más en términos de potencia el nodo solo debería enviar la clasificación del paciente. En la tabla 8, se presenta el número de bits requeridos para enviar la información de la aplicación MERIS sin extracción de características y con esta.

Tabla 8 Extracción de características

DATO	RANGO DE VALORES	# BITS -SIN	# BITS - CON
FC	0 a 220 ppm	8	4
FR	0 a 50 rpm	6	3
SaO2	0 a 100%	7	2
Clasificación	1 verde 2 amarillo 3 rojo	2	2

3.3.3 Protocolo de iniciación, mantenimiento de la red y acceso al medio

La estación base usa la estructura de supertrama para manejar la comunicación con los nodos de la red. El formato de la supertrama lo define la *Gateway*, la cual lo envía periódicamente dentro de la trama *beacon* a todos los nodos de primer rango de la WSN. La supertrama está limitada por dos tramas *beacon* y cuenta con un período de actividad (transmisión de información a la *Gateway*) y uno de inactividad como muestra la Figura 11.



Fig. 12 Partes de una supertrama

Según el protocolo cada nodo de la red que recibe un *beacon*, debe retransmitirlo. Sin embargo, este funcionamiento plantea un problema y es que el mensaje de *beacon* puede quedar vagando por la red infinitamente. Para ello, se adiciono un campo en la estructura de trama de *beacon* denominado “número mágico”, así por cada mensaje de *beacon* enviado se adjunta a este un número; cuando el mensaje llega al nodo comprueba si este número ya ha sido ejecutado y si no es así, lleva a cabo la orden, retransmite una única vez el mensaje a sus vecinos cercanos y almacena el último número, con lo cual se evita que un nodo repita infinitamente un mensaje que para él es siempre nuevo. En la figura 12 se presenta este funcionamiento.

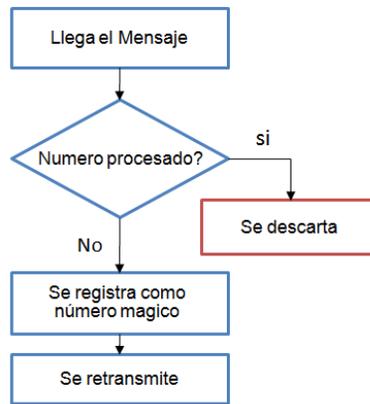


Fig. 13 Diagrama de funcionamiento protocolo diseminación

El *beacon* le indica a todos los nodos cuando se ha iniciado el periodo de transmisión, los cuales conocen *a priori* su duración y la dirección o identificador del nodo *Gateway*. Así una vez los nodos reciben el primer *beacon*, estos envía sus mensajes de solicitud de ingreso a la red en el último 10% de duración del periodo de transmisión, dado que hasta ese momento no se le ha asignado un ST para transmitir.

La *Gateway* antes de enviar el siguiente *beacon*, suma todos los paquetes que ha recibido a lo largo del periodo de transmisión y contabiliza cuantos mensajes ha generado cada nodo y según esto define el porcentaje de tiempo del periodo de transmisión que le corresponde a cada nodo, el tamaño de los ST no es fijo y se hace dinámicamente con el fin de que este tiempo sea coherente a la cantidad de información que debe enviar cada nodo de primer rango, la cual depende del número de hijos, es decir, nodos de segundo rango que lo utilizan como puente. Dado que la información de asignación del ST viaja en el *beacon*, se requiere de un tiempo para sincronizar todos los nodos del primer rango, no obstante los mensajes de los nodos que aún no se les ha asignado su ST no se pierde dado que por defecto este sigue enviando sus datos en el último 10 % de la trama de transmisión hasta que le asigne.

La *Gateway* debe mantener una tabla asociada a los nodos de primer rango denominada 'tabla de vecinos', la cual se va ir llenando a medida que se van adicionando los nodos en la red, el orden de ingreso a la tabla define el orden en el que la *Gateway* les va a asignar el ST de transmisión.

En la figura 13, se presenta a través de un diagrama el comportamiento de la red para lograr la sincronización de dos nodos A y B. En el cual se puede observar que después del primer *beacon*, los nodos envían en el 10 % del periodo de transmisión la solicitud de ingreso a la red, después la *Gateway* contabiliza el número de mensajes que le llegaron, para este ejemplo 10, donde 8 son del nodo A y 2 del nodo B, entonces la *Gateway* para sincronizarlos, detecta quien se comunico primero, en nuestro caso A y lo adiciona a la tabla de vecinos en la primera posición y en la segunda ubica al nodo B, ahora se define el porcentaje de tiempo de transmisión de cada nodo de acuerdo a la cantidad de información que estos requieren enviar, así queda el nodo A con el 80% y el B con el 20%, en el segundo *beacon* la *Gateway* informa al nodo A su ST, dato que también recibe el nodo B, después del periodo de transmisión la *Gateway* de nuevo verifica los porcentajes de ST para cada nodo, en caso de que estos hayan cambiado la *Gateway* envía en el tercer *beacon* la información de su ST al nodo B, quien como ya conoce el

valor del ST asignado al nodo A no traslapa la información, para el cuarto *beacon* la *Gateway* envía el nuevo valor de ST de A, es decir 70%. Este procedimiento se repite durante todo el funcionamiento de la red.

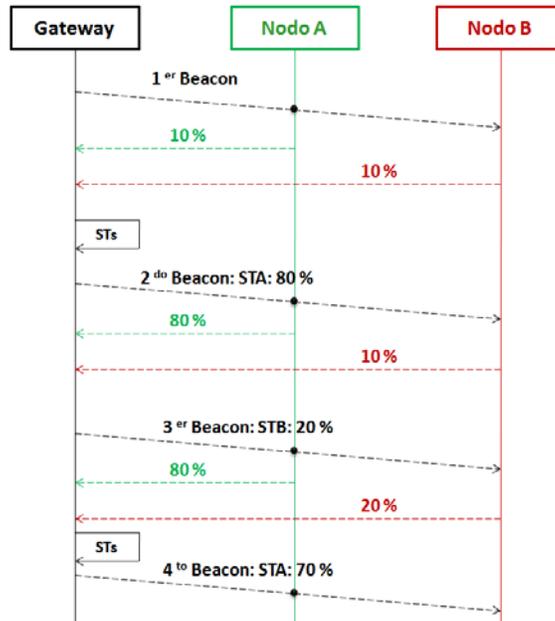


Fig. 14 Ejemplo del comportamiento de la WSN

3.3.4 Políticas de priorización en el envío de mensajes a la *Gateway*

La *Gateway* solo se comunica y define ST de transmisión de datos para los nodos de primer rango, esta decisión se adoptó teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la prueba a la WSN descrita en el apartado 5.2.1.2 donde se concluyó que no es recomendable llevar a cabo la sincronización de los nodos de segundo rango desde la *Gateway* debido a que la latencia en estos es más del doble que la considerada para los de primer rango.

Por lo tanto, los nodos de primer rango tienen la responsabilidad de decidir cuál de los mensajes que tienen en cola enviará primero a la *Gateway*, para lo cual puede hacer uso de dos criterios, el primero que se aplica es el nivel de prioridad del mensaje dada por la clasificación del paciente, así un mensaje de un paciente clasificado como rojo será enviado de primero, si es amarillo después de todos los rojos y si es verde después de los rojos y amarillos, la llegada de los paquetes verdes está garantizada dado que estos tienen un plazo mayor que los mensajes amarillos o rojos; cuando en la cola de mensajes se tiene más de un paquete con la misma prioridad (color), se aplica el criterio del tiempo de vida que le queda al mensaje en la red, el cual se estima a partir del plazo definido al mensaje, que es un valor coherente a la información de clasificación del paciente, menos la diferencia en la marca de tiempo del mensaje con el tiempo local del nodo de primer rango.

3.3.5 Algoritmo de Enrutamiento

Este algoritmo solo lo aplican los nodos que se encuentra en el segundo rango, dado que los de primer rango están conectados directamente el nodo *Gateway*; un nodo define

cuando debe cambiar de padre teniendo en cuenta un valor mínimo de Indicador de Fuerza de la Señal Recibida RSSI. La responsabilidad de este protocolo, es definir el padre o nodo de primer rango que brinde el camino más confiable para alcanzar el destino.

El algoritmo de enrutamiento se hace uso de la campos que aparece en la ‘tabla de vecinos’ que tiene cada nodo de la red, para definir a que nodo le va a enviar su información, el algoritmo inicia evaluando entre el número de saltos que han recorrido los mensajes de cada nodo para llegar a él, si estos son iguales, verifica entonces el contador de mensajes recibidos (Evictor) por cada nodo para conocer el grado de presencia del nodo en la red, si estos también son iguales, compara entonces el Indicador de Calidad del Enlace (LQI), si estos aún son iguales entonces finalmente evalúa el RSSI.

En la tabla 9 se presenta, un ejemplo de la aplicación de este algoritmo, donde se puede observar: primero que al revisar la columna de número de saltos se descarta el envío de información por el nodo 2 dado que se encuentra a un mayor número de saltos a la Gateway en comparación con los otros, segundo al revisar el parámetro de *Evictor* se descarta el nodo 4 por tener el menor indicador de presencia en la red, tercero al comparar los valores de LQI se descarta el nodo 1, y cuarto al verificar los valores de RSSI se descarta el nodo 5 por lo cual el nodo elegido para enviar la información es el 3.

Tabla 9 Ejemplo de una tabla de vecinos

Nodo ID	# saltos	Evictor	LQI	RSSI
1	2	5	200	17
2	3	5	200	20
3	2	5	250	25
4	2	3	250	10
5	2	5	250	23

Además, de los campos presentados en la tabla 9 para la tabla de vecinos, esta contiene también la información referente al *Offset* (diferencia entre los tiempos locales del nodo dueño de la tabla y su vecino), paquetes recibidos, porcentaje de inicio y porcentaje final, empleados para la asignación del ST. Con cada *beacon* de la Gateway se actualizan las tablas de vecinos que hay en cada nodo con el fin de seguir la dinámica de la topología de la WSN, generada al entrar y salir nodos de ella.

3.4 Modelado del sistema MERIS

El sistema MERIS puede ser visto como la relación de un conjunto de subsistemas que median entre el paramédico y el paciente, entre los que se encuentran: la estación base encargada de presentar la información del paciente y la red al personal médico, la estación móvil que presenta solo la información del paciente sobre un asistente digital personal PDA, la Gateway que gestiona y recolecta la información presente en la red y el nodo encargado de medir las constantes vitales del paciente y transmitir esta información a la Gateway, este subsistema hace referencia tanto a un nodo en primer o segundo rango. A continuación, se presenta el modelado a nivel funcional de cada uno de los subsistemas mencionados excepto la estación móvil dado que se encuentra por fuera del alcance de este trabajo de investigación.

3.4.1 Modelado Estación base

En la figura 15 se presenta el diagrama de casos de uso para la estación base, los cuales representan las principal funcionalidad que el paramédico puede ejecutar sobre la aplicación que se ejecuta sobre la estación base y en la cual participa la Gateway como la entidad que resuelve las peticiones de información.

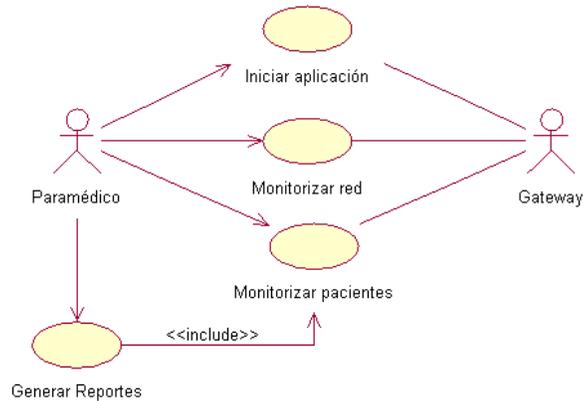


Fig. 15 Diagrama de casos de uso para la estación base

En las tablas 10, 11, 12 y 13 se presentan la descripción de cada uno de los casos de uso para la estación base.

Tabla 10 Caso de uso iniciar aplicación

INCIAR APLICACIÓN	
Descripción	Este caso de uso, permite al paramédico iniciar la aplicación de monitoreo de pacientes conectados a la WSN.
Actores	Paramédico (inicializador), Gateway.
Precondición	Debe existir al menos un paciente conectado a un nodo exitosamente y este a su vez a la Gateway.
Flujo Normal	1. El paramédico configura la conexión con el puerto USB, figura 16. 2. El paramédico da la opción de conectar, figura 17. Si no se puede conectar sigue el FE1
Flujo de Excepción	FE1: sale un mensaje de error diciendo al paramédico que la conexión no se pudo efectuar.
Pos Condición	La aplicación esta lista para monitorear la red.



Fig. 16 Configurar conexión



Fig. 17 Conectar a la Gateway

Tabla 11 Caso de uso monitorizar pacientes

MONITORIZAR PACIENTES	
Descripción	Presenta al paramédico los valores de los signos vitales y la clasificación del grupo de pacientes que están conectados a la WSN, los cuales le han sido entregados por la Gateway, la clasificación se presenta a través de uno de los Colores (rojo, amarillo y verde) del código internacional de colores, además de esta información se le presenta el tiempo que le ha tomado al mensaje llegar a la Gateway desde su generación y se le permite al paramédico relacionar los signos vitales con el nombre del paciente. Supervisar
Actores	Paramédico (Iniciador), Gateway.
Precondición	Debe existir al menos un paciente conectado a un nodo exitosamente.
Flujo Normal	<ol style="list-style-type: none"> 1. El Paramédico ingresa a la interfaz de monitoreo, a través de la opción VER/ monitorización de signos vitales del menú. 2. La aplicación presenta la información de cada paciente dentro de una lista, en la cual el usuario visualiza como se van actualizando cada registro de un paciente, figura 18, sin embargo si el paramédico desea almacenar los datos llevando un histórico este puede elegir la opción de Configuración/Histórico donde los datos de los signos vitales no se sobre escribe sino que cada vez que se actualiza cree una nueva fila dentro de la tabla figura 19.
Casos de uso relacionados	Guardar signos vitales, borrar signos vitales

id	Plazo	Paciente	Triage	Respiración	Cardica	Saturación
5	1048msg	carolina perez	Red	11	50	90
7	1044msg	rafael lopez	Amo	29	67	95
1	3msg	pablo montero	Ver	16	70	102
6	1108msg	andres ceballos	Red	13	50	90
2	1385msg	claudia ramirez	Ver	38	100	89
3	463msg	carolina rojas	Ver	18	70	96
4	997msg	1254686373866	Red	12	50	90

Fig. 18 Monitorear Signos vitales

id	Plazo	Paciente	Triage	Respiración	Cardíaca	Saturación
1	6msg	1254686587502		29	113	94
6	1120msg	1254686587539		23	100	95
2	1403msg	1254686587717		25	42	93
4	841msg	1254686587949		6	50	90
3	756msg	1254686588237		18	70	92
5	1045msg	1254686588785		12	50	90
7	1msg	1254686589040		27	92	95
1	4msg	1254686624610		25	106	94
6	1128msg	1254686624714		5	50	90
2	1412msg	1254686625038		15	70	99
4	844msg	1254686625300		18	70	101
3	767msg	1254686625566		34	100	89
7	775msg	1254686625882		37	100	89
5	1055msg	1254686625883		38	100	89
1	5msg	1254686626582		22	111	94
6	1125msg	1254686626677		36	100	89
2	1411msg	1254686626962		22	44	93
7	7msg	1254686627078		39	100	89
4	846msg	1254686627239		26	61	95
3	770msg	1254686627505		25	88	95
5	1051msg	1254686627829		26	47	93
1	3msg	1254686628531		12	50	90
6	1133msg	1254686628638		17	70	98
2	1413msg	1254686628910		27	64	95
7	0msg	1254686629002		22	92	95
4	856msg	1254686629185		15	70	89
3	773msg	1254686629450		20	70	96
5	1044msg	1254686629754		28	53	93

Fig. 19 Monitorear signos vitales continuamente

Tabla 12 Caso de uso edición información de pacientes

GENERAR REPORTES	
Descripción	Permite al paramédico guardar los datos recibidos de los signos vitales del grupo de pacientes que han sido monitoreados.
Actores	Paramédico (inicializador)
Precondición	Existen datos almacenados en la interfaz de monitoreo de pacientes.
Flujo Normal	El paramédico elige la opción Aplicación/Guardar, si desea guardar los datos en un archivo XLS, figura 20.
Pos Condición	Archivo XLS con la información de los signos vitales de un grupo de pacientes.

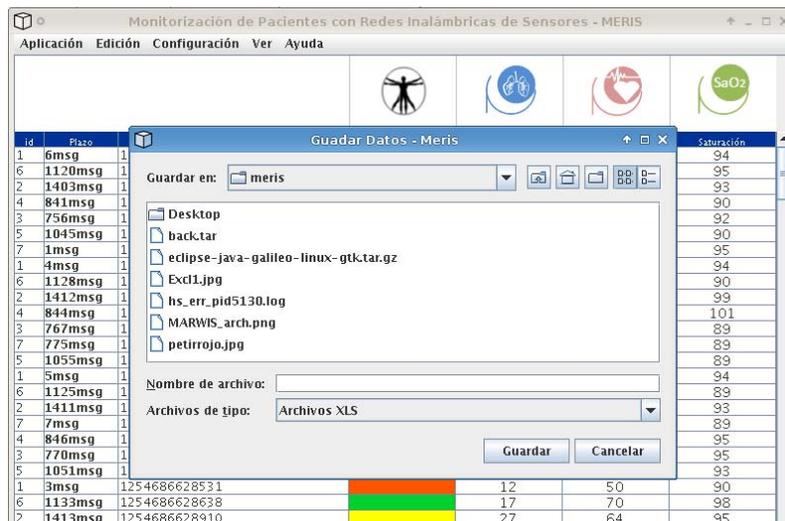


Fig. 20 Guardar datos signos vitales

Tabla 13 Caso de uso monitorizar red

MONITORIZAR RED	
Descripción	Le permite al Paramédico monitorear la WSN desde tres perspectivas diferentes, la primera visualizando la topología de la red a través de un grafo, figura 21, la cual le permite conocer la ubicación relativa de los nodos; la segunda, por medio de la tabla de enrutamiento de la <i>Gateway</i> que contiene datos relacionados con la calidad de los enlaces, el porcentaje de tiempo de transmisión de cada nodo, el RSSI, el LQI entre otros, figura 22, con el fin de que este pueda verificar que los nodos se encuentran bien ubicados; y la tercera presentándole las trazas de mensajes recibidos en la <i>Gateway</i> , figura 23.
Actores	Paramédico (inicializador)
Precondición	Debe existir al menos un paciente conectado a un nodo exitosamente.
Flujo Normal	<ol style="list-style-type: none"> 1. El paramédico elige la opción “ver tabla de enrutamiento”. 2. Se despliega la información relacionada con la tabla. 1. El paramédico selecciona la opción ver topología de la red. 3. En una nueva ventana se presenta la topología de la red a través de un grafo.

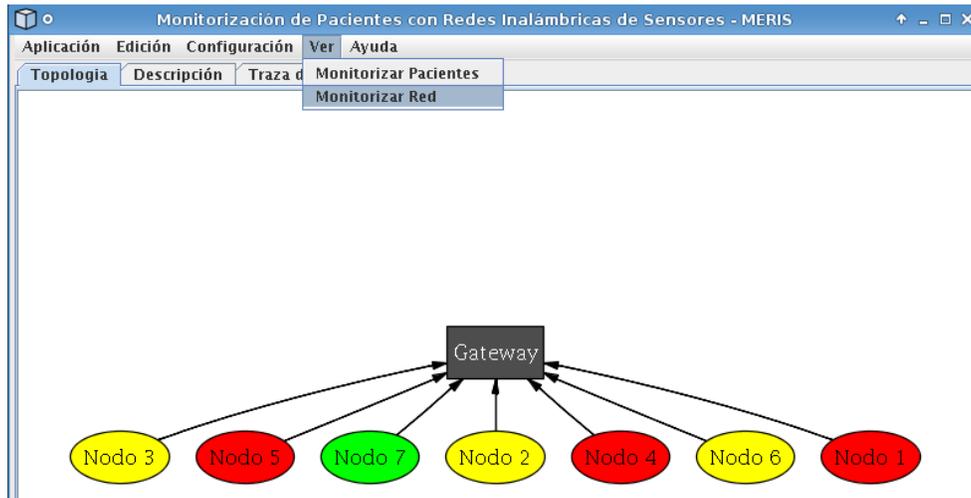


Fig. 21 Topología de red

Dirección	Saltos	Lqi	Rssi	Evictor	Offset	% InicioTx	% FinTx
3	1	255	13	0	7852003	84	98
5	1	255	13	2	7854003	0	14
7	1	255	14	0	7856003	14	28
2	1	255	14	2	7862003	56	70
4	1	255	15	1	7850003	70	84
1	1	255	14	0	7858003	28	42
6	1	255	14	0	7860003	42	56

Fig. 22 Información de red

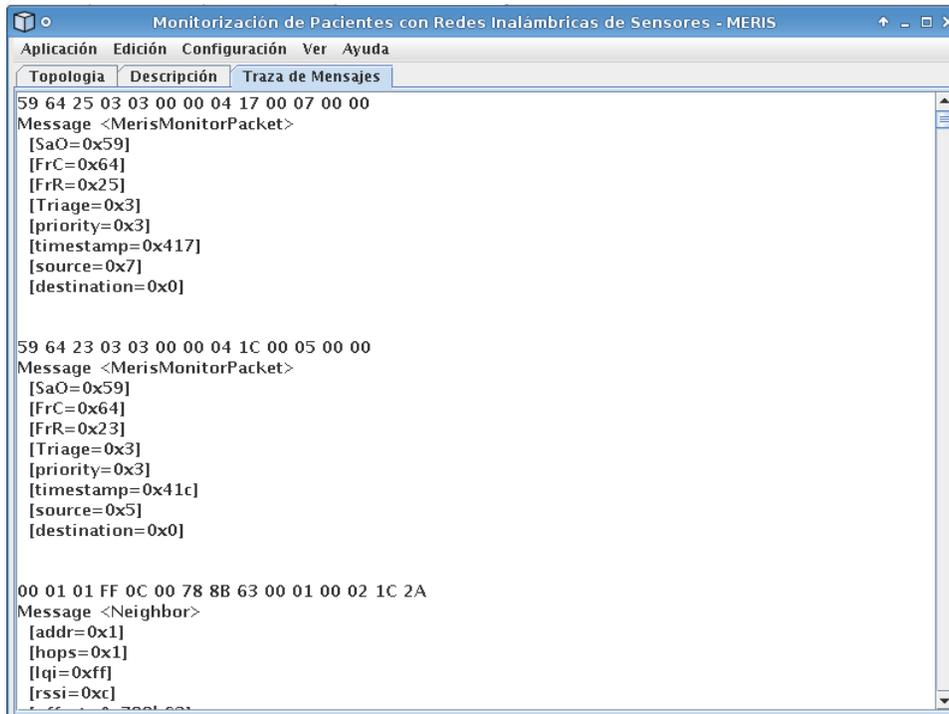


Fig. 23 Trazas de mensajes

3.4.2 Modelado Gateway

En la figura 24 se presenta el diagrama de casos de uso para la *Gateway*, en el cual se presentan sus dos principales funcionalidades el envío de información del nodo a la estación base y la sincronización de los nodos disparada periódicamente por el actor reloj.

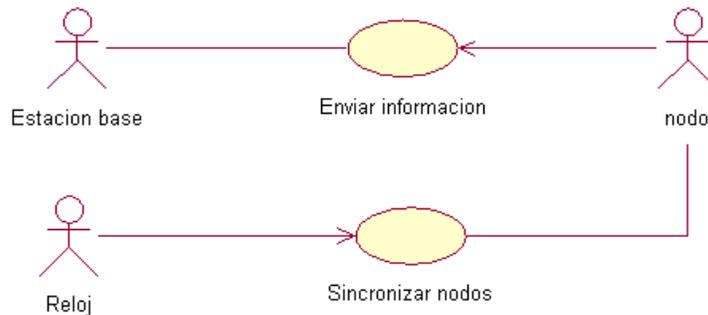


Fig. 24 Diagrama de casos de uso para la *Gateway*

En las tablas 14 y 15 se presenta la descripción de los casos de uso de la *Gateway*

Tabla 14 Caso de uso sincronizar nodos

SINCRONIZAR NODOS	
Descripción	La <i>Gateway</i> a través de <i>beacons</i> asigna ST de transmisión dinámicamente a todos los nodos que se encuentran en el primer rango de acuerdo a la cantidad de mensajes que cada uno le emite.
Actores	Reloj (inicializador), nodo.

Precondición	Debe existir al menos un nodo de primer rango.
Flujo Normal	El reloj de la <i>Gateway</i> envía un <i>beacon</i> al iniciar la supertrama para informarle a los nodos de la red que envíen su información, una vez terminado el periodo de actividad calcula el número de paquetes recibidos de cada nodo y según esto asigna los porcentajes de transmisión del periodo de actividad que cada nodo va a tener para transmitir su información (esta operación se realiza cada 3 <i>beacons</i>), luego informa a cada uno de los nodos de su ST en los siguientes <i>beacons</i> ; la sincronización de la red se reinicia una vez que la <i>Gateway</i> ha enviado todos los ST.
Pos Condición	Los nodos de primer rango están sincronizados con la <i>Gateway</i> , es decir, tienen asignado un ST para transmitir sus datos de acuerdo a la información que genera o transporta cada uno.

Tabla 15 Caso de uso enviar información

ENVIAR INFORMACIÓN	
Descripción	A medida que la <i>Gateway</i> captura la información de los nodos durante el periodo de actividad, registra dentro de su tabla de vecinos los datos relacionados con cada uno de los paquetes recibidos, luego está envía toda la información a la estación base.
Actores	Nodo (inicializador), estación base.
Precondición	Debe existir al menos un paciente conectado a un nodo exitosamente.
Flujo Normal	La <i>Gateway</i> recibe información del nodo que tiene asignado el ST actual y esta envía el paquete de datos a la estación base, además registra en su tabla de vecinos la información pertinente al mensaje y también la envía a la estación base.
Pos Condición	En la estación base está disponible la información de los signos vitales y clasificación del paciente relacionado con el nodo emisor y los datos relacionados a la recepción del mensaje.

3.4.3 Modelado Nodo

En la figura 25 se presenta el diagrama de casos de uso relacionados con el nodo, los cuales representan la funcionalidad básica de esta entidad, donde evaluar el estado de salud emplea al reloj como iniciador del caso de uso y enviar información puede ser iniciado por un nodo de primer o segundo rango y el almacenamiento de información es temporal se realiza hasta que se envía la información a la Gateway.

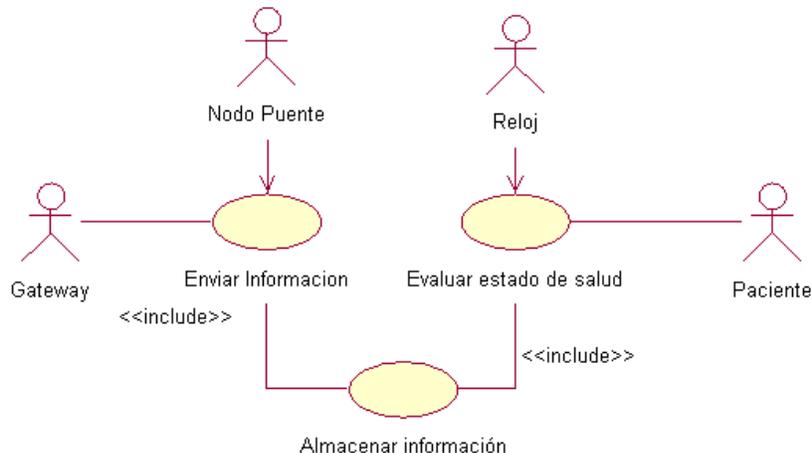


Fig. 25 Diagrama de casos de uso nodo

En las tablas 16, 17 y 18 se presenta la descripción de los casos de uso del nodo.

Tabla 16 Caso de uso evaluar estado de salud del paciente

EVALUAR ESTADO DE SALUD DEL PACIENTE	
Descripción	El nodo evalúa el estado de salud del paciente que está conectado a él, para lo cual, este captura las señales de los sensores, las procesa, calcula el valor de los signos vitales FR, FC y SaO2 y con estos define el nivel de atención que requiere el paciente: inmediata, urgente o moderada a través de uno de los colores del código internacional de colores. Esta información se mantiene en un buffer que luego será accedido por el caso de uso enviar información.
Actores	Reloj (iniciador), paciente
Precondición	Nodo instalado correctamente sobre un paciente
Flujo Normal	<ol style="list-style-type: none"> 1. El nodo inicia el proceso de captura de señales de los sensores, procesa la información y define la clasificación del paciente, si este proceso no se puede realizar entonces FE1. 2. Luego la información referente al valor de los signos vitales y su clasificación es almacenada en un buffer.
Flujos de Excepción	FE1: Ante la falla en el proceso de sensado, el nodo envía un mensaje de notificación de error a la <i>Gateway</i> .
Pos Condición	Paciente con nivel de atención definido y signos vitales medidos.

Tabla 17 Caso de uso almacenar Información

ALMACENAR INFORMACION	
Descripción	Permite almacenar tanto la información propia del paciente conectado al nodo como la recibida de los nodos de segundo rango que estén asociados a él.
Actores	Reloj (Iniciador)
Flujo Normal	Se almacena información cada vez que el paciente se evalúa y cuando el nodo recibe una trama de información de un nodo de segundo rango.
Pos Condición	Información almacenada en el buffer.

Tabla 18 Caso de uso enviar información

ENVIAR INFORMACION	
Descripción	Envía la información almacenada en el buffer en el ST que le ha sido asignado, para elegir el mensaje que envía primero, selecciona el de mayor prioridad que ha sido asignada según la clasificación del paciente que tienen asociado y el plazo que le queda al paquete dentro de la red.
Actores	Reloj (iniciador), <i>Gateway</i> .
Flujo Normal	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se elige que información se va enviar primero, si es la propia se le adiciona la marca de tiempo, prioridad y plazo del mensaje. Si es de otro nodo se adiciona en la dirección el identificador del nodo que está sirviendo de puente. 2. Una vez el nodo tiene acceso al medio, utiliza su módulo de radio para enviar la información al nodo <i>Gateway</i> o al nodo de primer rango que ha seleccionado como padre teniendo en cuenta entre otros los parámetros del RSSI, LQI, número de saltos y el Evector.
Pos Condición	Información enviada a la estación base o nodo.

3.4.4 Diagrama de despliegue del sistema

En la figura 26 se presenta el diagrama de despliegue para MERIS, en el cual se puede observar cada uno de los procesos que se llevan a cabo en cada una de las entidades.

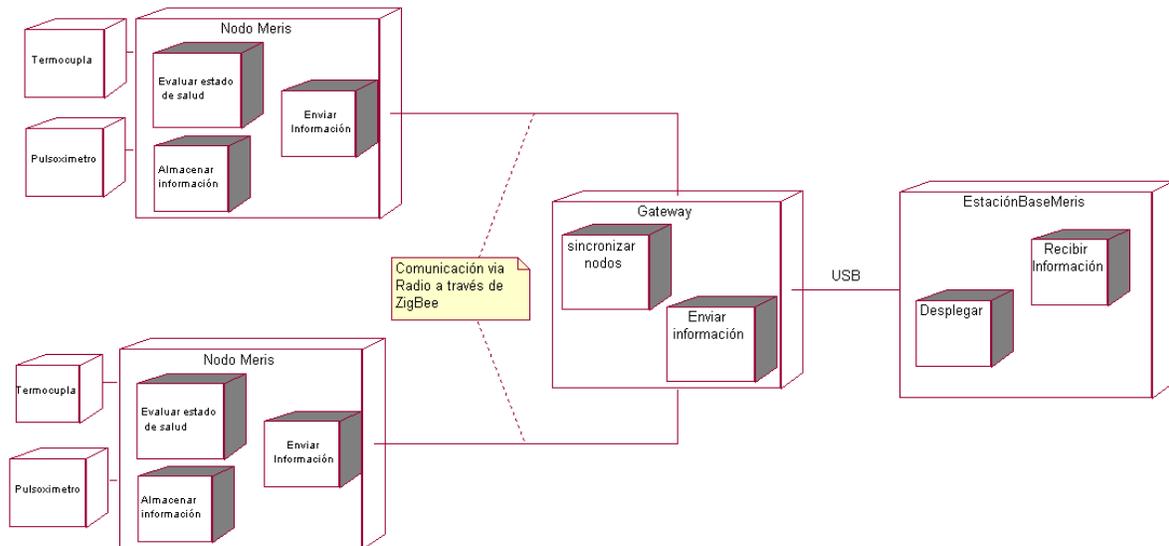


Fig. 26 Diagrama de Despliegue del sistema

3.5 Resumen

A continuación, se presenta en la figura 27 un diagrama que resume los conceptos presentados en este capítulo en forma de mapa mental.

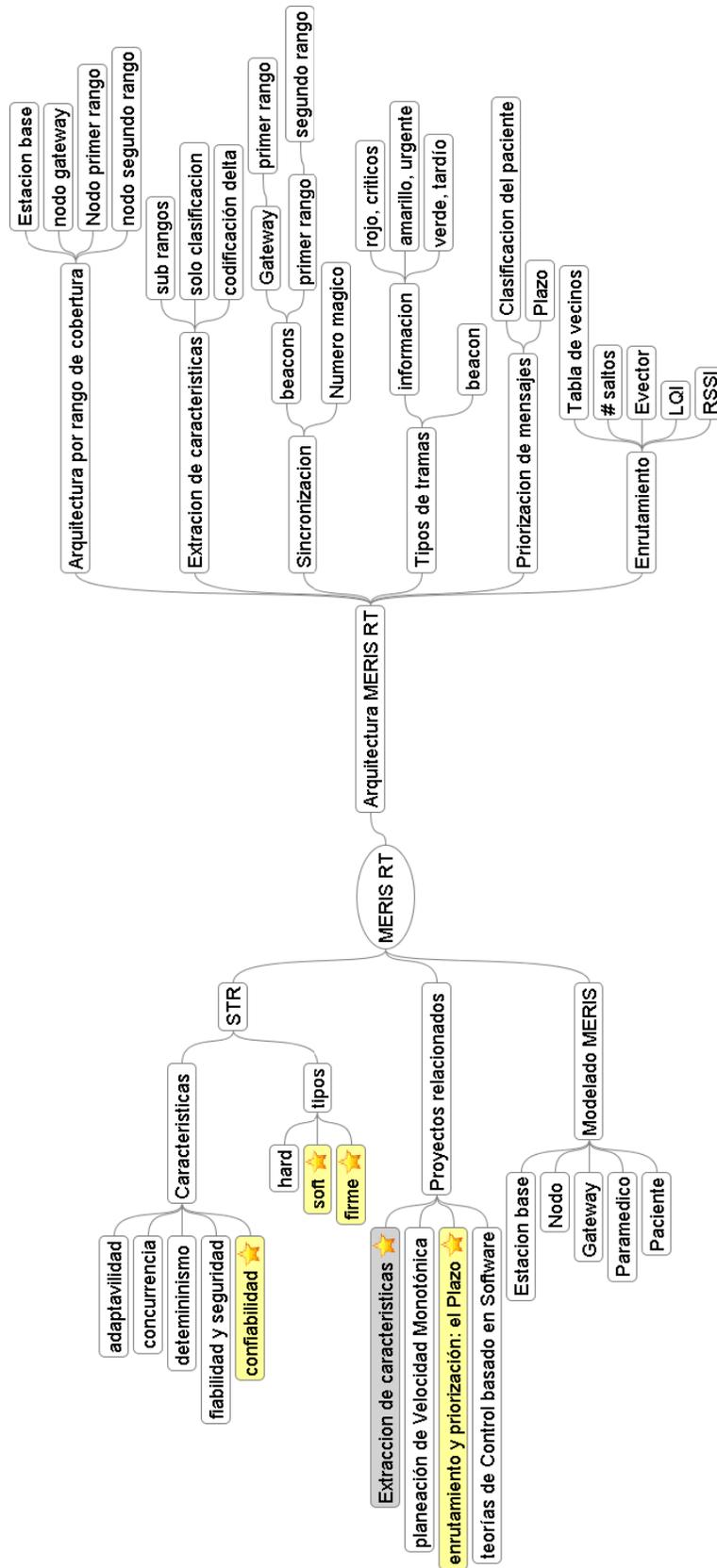


Fig. 27 Mapa conceptual capítulo III

CAPÍTULO 4 PROTOTIPOS DESARROLLADOS

El objetivo principal de este trabajo de maestría es otorgar a una WSN características de tiempo real como herramienta para la monitorización de constantes vitales, en el marco del proyecto MERIS. Lo cual implica dos desarrollos, el primero diseñar y construir una placa prototipo de sensado para un nodo dentro de WSN-CEI que permita capturar los valores de las constantes vitales más pertinentes dentro del contexto del proyecto MERIS y segundo implementar la arquitectura de comunicación propuesta. Sin embargo, este último desarrollo no fue posible realizarlo sobre la WSN del CEI como se había considerado inicialmente, porque en el marco de cooperación generado por el proyecto MERIS con el CEI solo fue posible obtener un único nodo, con el cual no se podía establecer una prueba coherente a los alcances de la propuesta, por lo tanto, se considero adicionar este nodo a la WSN de nodos IRIS que adquirió la Universidad del Cauca a finales del año 2008, desafortunadamente no fue posible comunicar el módulo de radio del nodo CEI (ETRX2) con el del nodo IRIS (RF230), por lo cual, se decidió implementar la arquitectura propuesta en este trabajo de maestría sobre la WSN de nodos IRIS. En este capítulo, se presenta la información pertinente para el desarrollo de cada uno de los prototipos generados.

4.1 Prototipo I: Adaptación del nodo CEI para el proyecto MERIS

La adaptación del nodo CEI para el proyecto MERIS, involucro un conjunto de actividades tales como: (1) estudio del nodo CEI, (2) elección de los signos vitales, (3) selección de las técnicas de medición para los signos objetivos y sus transductores, (4) diseño de los bloques de adaptación *hardware* y *software* para cada uno de los transductores, (5) diseño de la placa de sensado y procesamiento para el nodo CEI, (6) fabricación física de la placa de circuito impreso (PCB) de sensado y procesamiento y (7) implementación de una interfaz de visualización de los datos. Las actividades 2, 3, 4 y 7 se realizaron en conjunto con un grupo de estudiantes de pregrado [62]. Por su parte, las actividades 1, 5 y 6 se llevaron a cabo durante la estancia de investigación en el CEI.

Una importante característica que se tuvo en cuenta para el diseño de las placas fue reducir al mínimo el consumo de energía de estas pero proporcionando al mismo tiempo el mayor rendimiento. Diseñar las placas para un bajo consumo supuso elegir componentes de baja potencia, algo que a primera vista puede parecer trivial, pero que suele ser más complejo de lo que parece. El primer parámetro a considerar fue el consumo de energía del microcontrolador y los sensores durante el modo normal de operación. La elección de elementos de baja potencia implica normalmente aceptar compromisos sobre el rendimiento medio. Por lo tanto, se eligió elementos con el rendimiento justo para poder hacer el trabajo. Es importante que el consumo de energía en modo durmiente sea bajo. Otro aspecto que también se tuvo en cuenta es el tiempo de activación y desactivación de los elementos ya que entre mayor sea este mayor consumo habrá. Finalmente, se busco que el microcontrolador integrara todos los módulos necesarios para la aplicación como un ADC, DAC para evitar incluirlos externamente y así reducir el consumo que estos generarían.

En esta sección, se presenta inicialmente el estudio del nodo CEI, luego la justificación de la elección de las técnicas de medición utilizadas para los signos seleccionados y sus transductores, después los bloques de adaptación y *layouts*. Los esquemáticos y la lista de elementos de montaje superficial requeridos para la fabricación de las placas de sensado y procesamiento así como su costo se presentan en el anexo de esta monografía

4.1.1 Estudio de la Red Inalámbrica de Sensores del CEI

El Centro de Electrónica Industrial desarrollo un prototipo de nodo para WSN [85] [86] [87], implementando una arquitectura modular, integrada por cuatro capas que satisfacen diversas funcionalidades dentro del nodo de forma que se dispone de una plataforma fácilmente adaptable y flexible a diversos entornos y aplicaciones tanto en hardware como en software.

El nodo está dividido en 4 capas, hechas cada una en un PCB independiente, donde cada una se ocupa de una de las siguientes tareas: procesamiento, sensado, comunicación y alimentación, figura 28. También se fabricó una capa auxiliar de almacenamiento de datos para las aplicaciones que lo requieran y una de expansión para pruebas.

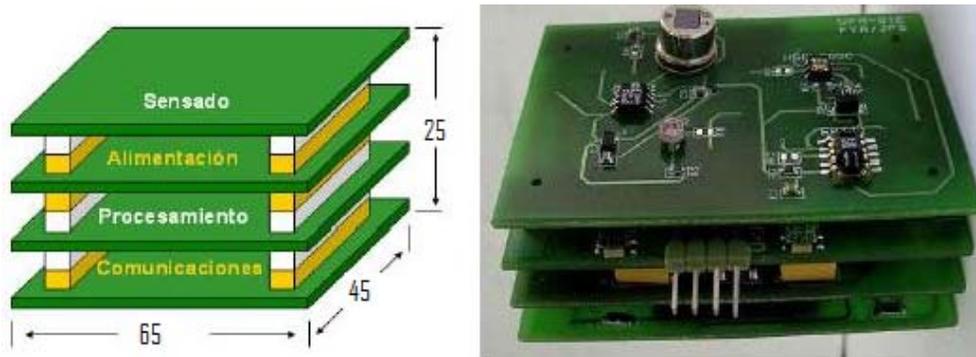


Fig. 28 Nodo en capas propuesto por el CEI (mm).

Las capas están unidas entre sí a través de conectores verticales, los cuales proporcionan la modularidad del nodo, la conexión mecánica, eléctrica, y permiten que las señales viajen por todo el nodo, lo cual reduce el tamaño del nodo al aprovechar la dimensión vertical. Las conexiones son fijas con el objetivo de estandarizar la arquitectura física del nodo y evitar conflictos, así por el conector derecho van las señales digitales y por el izquierdo las analógicas. A continuación se describe cada una de las capas:

- **Sensado** capa donde se incluyen los sensores encargados de medir los parámetros físicos que son objeto de estudio, es decir, este módulo es el que interactúa con el entorno para medir y proporcionar una señal eléctrica de salida. Teniendo en cuenta la distribución de señales los sensores digitales deben ir conectados al conector derecho y los analógicos al izquierdo.

La placa de sensado con la que contaba el CEI para el momento de este estudio (marzo del 2008) contiene los siguientes sensores: un acelerómetro (ADXL213 de *Analog Devices*) con salida digital PWM, capaz de medir aceleraciones dinámicas (vibración) y estáticas (gravedad) y tres sensores de temperatura de *Maxim*, el MAX6576 con salida digital en forma de señal cuadrada de periodo proporcional a la frecuencia y a la temperatura absoluta en °K; el DS18S20 con salida I2C de 9 bits y el DS1629 con salida *1-wire* digital de 9 bits y al mismo tiempo incorpora un reloj contador de segundos, minutos, horas, días, semanas, meses y años, manteniendo el ajuste de los años bisiestos hasta 2100.

- **Comunicación** esta capa transmite de forma inalámbrica los datos tomados por los sensores a otro nodo, o a la estación central dependiendo de su localización. El CEI seleccionó inicialmente la tecnología inalámbrica *Bluetooth*, debido a su velocidad de transferencia de datos (723,2 Kb/s en una dirección), su bajo consumo y al hecho de que opera en la banda de frecuencias ISM de 2,4 GHz que no requiere licencia.

Sin embargo, esta tecnología fue reemplazada por el módulo *ZigBee* ETRX2, el cual cuenta entre sus características con: bajo consumo de potencia, funciona como dispositivo final, *Router* o coordinador, tres antenas internas, tasa de datos de 250kb/s, 128k de memoria flash, 5k bytes de SRAM, soporta encriptación AES-128 y cuatro modos de potencia para extender la vida de la batería.

- **Alimentación:** capa encargada de proporcionar al nodo la energía necesaria para su funcionamiento. Teniendo en cuenta que un nodo puede albergar elementos que operen a diferentes voltajes, esta capa cuenta con el regulador LM1117 de *National Semiconductor* que transforma la alimentación de 5 V que recibe de una dos pilas AA a un rango de voltajes que se encuentra entre 1,2 V a 13,8 V.
- **Memoria:** esta capa almacena los datos obtenidos por los sensores durante el funcionamiento de la red, se emplea en aplicaciones donde la transmisión de datos es continúa pero sin restricciones de tiempo severas. La capa cuenta con una memoria SRAM y otra FLASH de 4Mbits de capacidad cada una.
- **Procesamiento:** esta capa proporciona la inteligencia al nodo, es responsable de tareas como: procesar directamente las señales digitales, convertir las señales analógicas de los sensores a señales digitales apropiadas, controlar las comunicaciones gestionando la búsqueda de nodos vecinos, administrar todas las tareas relacionadas con la red y manejar los modos de funcionamiento de ahorro de energía, para prolongar la vida de la pila. Esta capa puede estar compuesta por solo un microcontrolador o una FPGA (*Field Programmable Gate Array*) o los dos como se muestra en la figura 29.

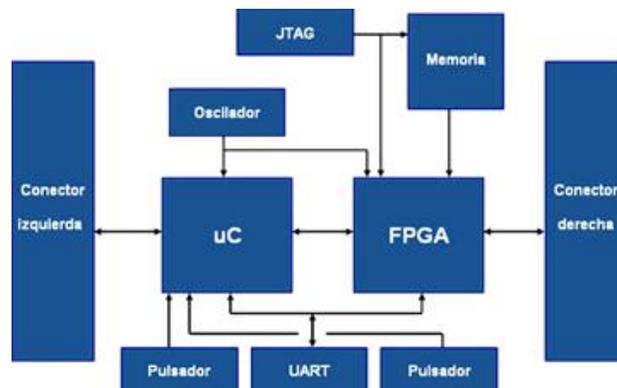


Fig. 29 Arquitectura capa de procesamiento

La placa de procesamiento con la que cuenta el CEI para el momento de este estudio contiene los siguientes elementos: (1) el microcontrolador ADuC831 de Analog Devices, el cual tiene: un núcleo de 8 bits compatible con Intel 8051, memoria Flash/EE de programa de 62 KBytes, memoria Flash/EE de datos de 4

KBytes, XRAM 2304 Bytes, periféricos integrados como un CAD de 8 canales con velocidad de captura de 200 Ksps, 2 CDA, 3 *Timers* y comunicación I2C, SPI y UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*). (2) la FPGA Spartan III XC3S200, que se encarga del procesamiento de las señales de los sensores digitales, tiene una capacidad máxima de 200k puertas lógicas y se programa desde un PC a través del puerto JTAG. (3) la Memoria XCF01S de Xilinx, que mantiene las configuraciones de la FPGA debido a que esta es de tipo volátil. (4) dos pulsadores KMS de *Ittcannon*, uno para ejecutar el *reset* que actúa sobre el microcontrolador, la FPGA y el módulo bluetooth y el otro para establecer el modo de programación del microcontrolador, y (5) un oscilador CFPS-73 de C-MAC, que genera la señal de reloj de 11,0592 [MHz].

- **Expansión** esta es una placa auxiliar que no va incorporada al nodo definitivo. Su función es la de permitir una mayor facilidad y fiabilidad a la hora de realizar pruebas sobre el resto de las placas. Sólo está compuesta por dos conectores de tipo hembra situados en su cara inferior, y por varias tiras de pines situadas en su cara superior, como se aprecia en la figura 31. Las señales que llegan a los conectores son enviadas a alguno de los pines de la cara superior, quedando perfectamente identificadas y lo suficientemente separadas de otras señales como para poder realizar mediciones con mucha mayor comodidad y seguridad, figura 30.

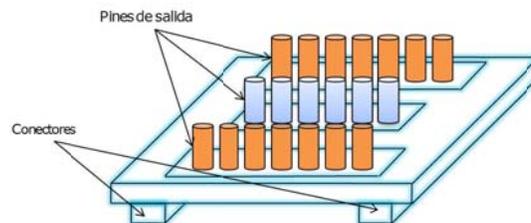


Fig. 30 Esquema de la placa de expansión con sus conectores.

4.1.1.1 Conexión de las capas

Las capas mencionadas no pueden tener una disposición arbitraria, dado que los sensores deben estar en contacto con el exterior, por lo que la placa de sensado debe ubicarse en uno de los extremos del nodo, por otra parte, la antena de comunicación requiere espacio libre a su alrededor para evitar interferencias y permitir su correcto funcionamiento, por lo que la placa de comunicación debe ocupar la otra posición extrema del nodo, el resto de capas intermedias pueden colocarse en cualquier orden.

Cada una de las capas se implementa en PCB con un tamaño de 4,5 x 6,5 [cm] de área. La dimensión física de los componentes intermedios es de altura máxima de 4,6 [mm], figura 31.

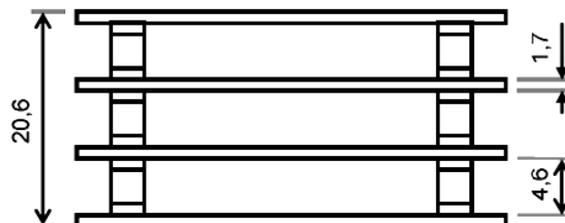


Fig. 31 Dimensiones verticales del Nodo [mm].

La interconexión de las distintas capas entre sí se realiza a través de conectores de 60 pines verticales de montaje superficial, los cuales llevan a cabo la conexión eléctrica y mecánica de cada una de las capas con las adyacentes, lo que permite distribuir todas las señales a todos los módulos del nodo. En la figura 32, se muestra la huella de los conectores, con las dimensiones del encapsulado, que se utiliza en el diseño de las placas.

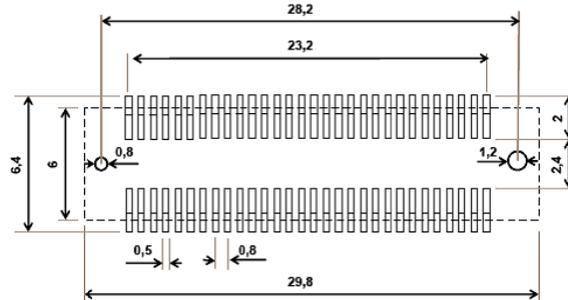


Fig. 32 Dimensiones de los conectores [mm].

Para permitir el intercambio y estandarizar el proceso de fabricación, el CEI ha definido algunas medidas que se deben tener en cuenta a la hora de ubicar los conectores, así:

- Los conectores de la cara superior son de tipo macho y los conectores de la cara inferior son de tipo hembra.
- Los dos conectores que pertenecen a una misma cara están orientados en el mismo sentido, de forma que sólo existe una manera de encajar cada módulo con los contiguos. Para simplificar la soldadura, se hace en cada capa la silueta del conector en su posición.
- Los conectores están situados en los extremos de las placas, así en el interior de las mismas habrá una área amplia para ubicar los distintos dispositivos.
- La distancia entre los conectores es de 44,65 [mm] figura 33, la cual debe ser la misma en todas las capas para que el intercambio entre ellas sea posible.

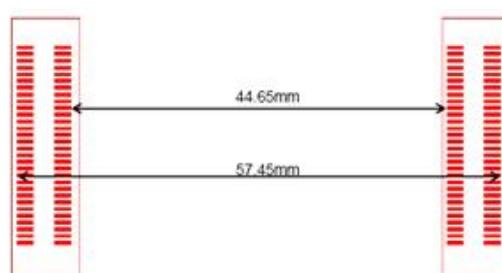


Fig. 33 Posición de los conectores en cada capa

4.1.1.2 Distribución de las señales

Las señales eléctricas viajan por el nodo a través de los conectores, que las distribuyen por las diferentes capas. Estas señales incluyen las alimentaciones que requieren los distintos dispositivos, las señales que representan las medidas físicas de los sensores, las señales procesadas que evalúan estas mediciones, las instrucciones de actuación para el módulo de comunicaciones, etc.

Como se mencionó, todas las señales de los conectores son comunes a todo el nodo, de esta forma, aunque hay pines de los conectores que no están asignados a ninguna señal del módulo, dichos pines son igualmente pasantes, en previsión de que sí estén conectados a alguna señal en futuras implementaciones de las capas. Lo cual por supuesto, limita el número de capas.

Las señales analógicas y señales digitales simples fluyen por el conector izquierdo, ya que pueden ser conectadas directamente al microcontrolador. Por otra parte, las señales digitales complejas están unidas al conector de la derecha puesto que son controladas por la FPGA

Esta distribución de las señales analógicas por la izquierda y las digitales por la derecha afecta también a las alimentaciones y masas. La alimentación analógica AVdd (3,3 V) se distribuye por el conector de la izquierda, aunque sólo por sus pines superiores, ya que los elementos que requieren de alimentación analógica son muy pocos. Los demás pines de alimentación principal, DVdd, distribuyen la alimentación digital de 3,3 V.

De igual forma, las alimentaciones de 2,5 V y 1,2 V (denominadas V2 y V1 respectivamente en los esquemas de conexión) sólo viajan por los conectores de la derecha, puesto que únicamente son necesarias para alimentar a la FPGA. En los conectores de la derecha también se han reservado algunos pines para otras alimentaciones, llamadas V3 de +5 V y V4 de -5 V.

En los nodos se han incorporado tanto elementos digitales como analógicos, por tanto, en todas las placas se han dispuesto dos planos de masa; uno digital y otro analógico. Los planos de masa son independientes para evitar ruidos pero se encuentran conectados por un punto común con la finalidad de compartir la referencia de voltaje. La masa analógica AGND sólo se distribuye por el conector de la izquierda. Los demás pines reservados a masa, denominados DGND, distribuyen la masa digital, figura 34.

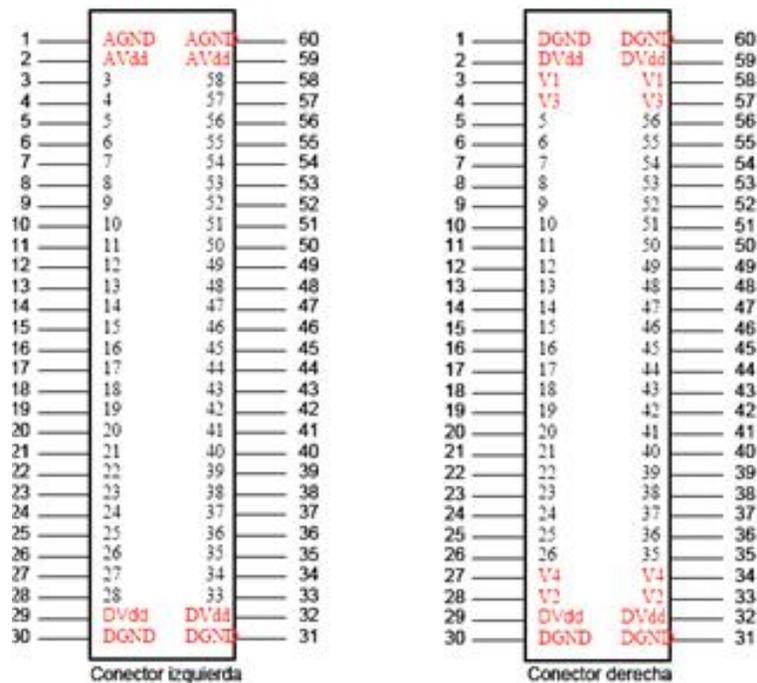


Fig. 34 Esquema de Conectores

4.1.1.3 Consumo de potencia del nodo

El CEI realizó una serie de pruebas y determinó que el consumo del nodo como un todo es de 100-110 [mA], en la tabla 19 se presenta el consumo de cada una de las capas, de las cuales se observa que las de comunicación y alimentación son las que más consumen corriente a diferencia de la de sensado.

Tabla 19 Consumo de cada capa del nodo CE

Módulo	Consumo característico
Alimentación	40 mA
Procesamiento	30 mA
Comunicación <i>Bluetooth</i>	40 mA
Sensado analógico digital	10-20 mA

4.1.2 Métodos para medir los signos vitales FC y FR, y sus transductores.

Para determinar los signos vitales de una persona se requiere el uso de métodos o técnicas, los cuales se clasifican en invasivos y no invasivos. Se han seleccionado los métodos no invasivos, dado que permiten la valoración de los signos vitales sin necesidad de tener que realizar punción o disección alguna, además de suministrar un fácil manejo, portabilidad y fiabilidad a nivel prehospitalario. A continuación, se presentan algunos métodos no invasivos que han sido seleccionados para la valoración de los signos vitales elegidos. Además de los sensores comerciales elegidos para cada uno de ellos bajo los criterios de consumo de potencia, facilidad de adaptación al nodo del CEI y su economía.

4.1.2.1 Frecuencia respiratoria

El monitoreo de la condición respiratoria es usualmente realizado a través de la detección del esfuerzo respiratorio; bien sea por la medida en los cambios de volumen presentes en la región del tórax y/o abdomen (también conocida como pletismografía), o por el monitoreo del flujo de aire (nasal y/u oral) que se puede realizar por la detección en los cambios de temperatura presentes en el flujo de aire del paciente, o las fluctuaciones de presión causadas por la inspiración y expiración. La primera opción fue descartada dado que provee un indicador cualitativo de los movimientos de la pared torácica y requiere de exactitud en la ubicación de los sensores, ya que de lo contrario afecta la calibración y consecuentemente, la calidad e interpretación de la señal respiratoria. Por tanto, se eligió entre los sensores que miden la frecuencia respiratoria a través del monitoreo del flujo de aire, dado que es una variable fisiológica utilizada para detectar fácilmente eventos no deseados asociados al proceso de respiración como lo son: apneas³, hipoapneas⁴ y limitaciones en el flujo respiratorio, los cuales son indicadores que pueden influir en el proceso de clasificación y priorización de víctimas.

En el mercado existen diversos sensores que utilizan este método, entre los cuales se eligió el Termistor Buconasal da *Biolink Sleep Support* [88], figura 35a, dado que es reusable, no requiere fuente de potencia externa. No obstante, si no existieran limitaciones desde el punto de vista económico, la elección sería diferente a la planteada, dado que los termistores y termocuplas permiten detectar los cambios de temperatura y responder ante ellos pero en caso de una obstrucción incompleta de la vía aérea, la

³ Cese del flujo de aire por más de diez segundos.

⁴ Decremento en el flujo de aire de al menos el 50% por más de diez segundos.

relación entre él y flujo de aire real no es directa. Así, la señal resultante puede verse reducida o inestable, dependiendo de las características del sensor y del procesamiento de la señal [89]. La solución sería un *AC Pressure airflow sensor* [90], figura 35b, que utiliza el monitoreo a partir de las fluctuaciones de presión, ya que este actúa de forma casi lineal al incremento en el flujo de aire, a través de sistemas de cánulas de presión nasal, lo cual implica una mayor exactitud en la detección de eventos obstructivos sobre la vía aérea [91] [92].

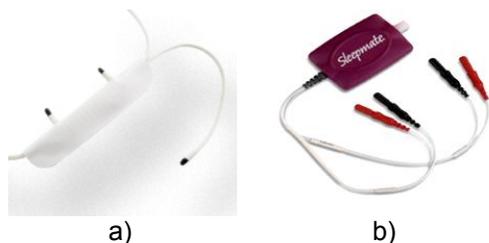


Fig. 35 a) Termistor Buconasal da *Biolink Sleep Support*, US\$ 290 y b) AC Pressure airflow sensor, US\$ 299.

4.1.2.2 Frecuencia cardiaca

El proceso de valoración de la FC ha sido más un proceso manual que automático dado por la misma fisiología del cuerpo humano, existen puntos donde las grandes arterias están cercanas a la piel y permiten ser evaluadas a través de la palpación. No obstante, con la finalidad de automatizar este proceso y realizarlo de forma constante, se han desarrollado métodos no invasivos como: la cardiografía de impedancia, oscilometría, ultrasonido Doppler, y pulsioximetría.

Los tres primeros métodos fueron descartados dado que requieren precisión en la ubicación de los sensores y estabilidad en la posición de los mismos, además el segundo y el tercero hace uso de inflado bien sea manual o automático; el manual implica que la persona encargada de valorar la FC debe estar con el paciente para poder monitorear este signo vital, aunque, el inflado automático del brazalete es la solución, esta involucra un aumento en el consumo de potencia en el dispositivo cada vez que se requiera monitorear la FC. Por tanto, la pulsioximetría es la técnica seleccionada ya que no solo mide la FC sino también la saturación de oxígeno de la sangre arterial (SaO₂), lo cual permite detectar cambios negativos en el estado de salud del paciente antes de que ellos sean clínicamente visibles. Esta técnica combina la fotopleximografía⁵ y las características de absorción de la hemoglobina a través del análisis de señales luminosas de longitudes de onda específicas (660 y 940 nm) para determinar el grado de oxigenación periférica.

Los sensores comerciales encontrados se ubican principalmente en tres partes del cuerpo; lóbulo de la oreja, frente y dedos de la mano, de las cuales los *finger clip sensors* han sido los más utilizados, dado que permiten obtener un mayor nivel de señal en comparación con los otros sitios del cuerpo humano donde se puede aplicar la técnica de pleximografía [93]. Por tanto, se ha seleccionado el sensor *Adult Finger Clip- 8000AA*, figura 36, ya que es reusable, fácil de usar, y posee una alta calidad en sus LEDs.

⁵ fotopleximografía determina las propiedades ópticas de un área específica de la piel, midiendo los cambios pulsátiles del volumen de sangre arterial en el sitio del sensor.



Fig. 36 Adult Finger Clip, US\$ 168.

4.1.3 Bloques de adaptación HW y SW

En esta sección se describen los correspondientes bloques de adaptación *hardware* y *software* para cada uno de los sensores seleccionados. En la figura 37, se presenta la solución propuesta, la cual consta de: la placa de sensado con sus módulos FR y FC encargados de adaptar y depurar las señales provenientes de el termistor y el pulsoxímetro respectivamente, constituidos por filtros, amplificadores y los conectores asociados a cada uno de los sensores; la placa de procesamiento que se encarga de recibir la información proveniente de los sensores, procesarla, y transmitirla por el UART a una tasa de 9600 Baudios al bloque de transmisión que se comunica con el PC por el puerto serie para desplegar los valores de la FC, FR, SaO2 y la clasificación del paciente, este último módulo se desarrollo para efectos de pruebas.

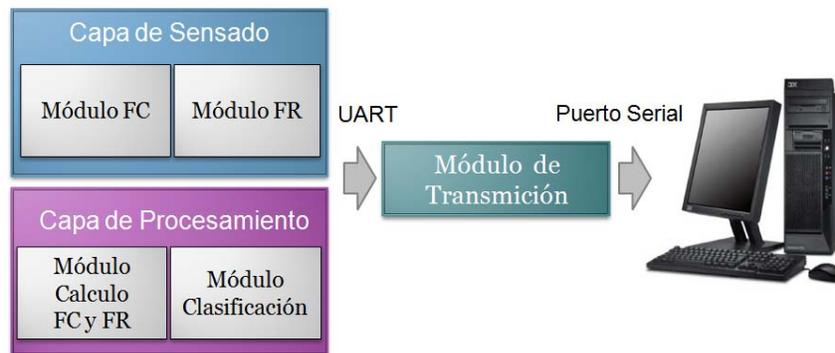


Fig. 37 Diagrama de Solución para el nodo MERIS.

A continuación se presenta una descripción de cada uno de los módulos que componen la capa de sensado, procesamiento y el bloque de transmisión.

4.1.3.1 Módulo FC

Para el diseño del módulo se tomó como base el diseño de un pulsoxímetro denominado "A Single-Chip Pulsoximeter Design Using the MSP430" de la empresa Texas Instruments (TI) el cual emplea el microcontrolador de muy bajo consumo de potencia MSP430FG437 (modo activo 300 μ A y en modo *standby* 1.1 μ A) [94]. Este diseño emplea mínimos componentes externos dado que aprovechar al máximo los módulos internos del microcontrolador tales como el ADC, DAC y UART. En la figura 38 se presenta los submódulos: punta de prueba, generador de pulsos y acondicionamiento de la señal del diodo PIN que componen el sistema pulsoxímetro.

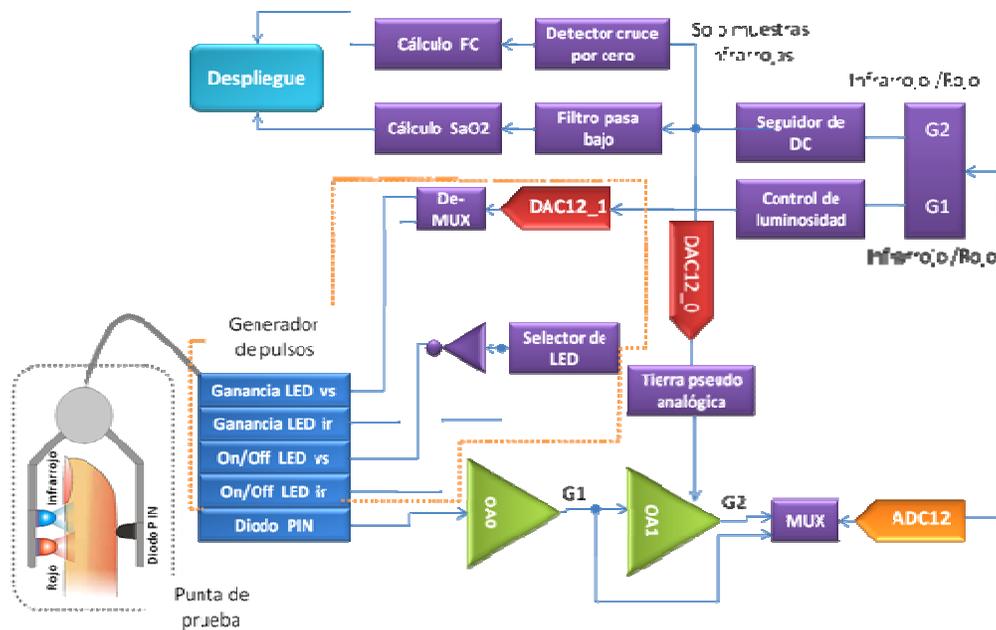


Fig. 38 Diagrama en bloques del módulo FC

Para la etapa de pruebas el grupo de trabajo creó dos puntas de prueba denominadas punta *ribbon* y punta blindada (Figs. 39a y 39b) a partir de los LEDs rojo (660 nm, BL-23G) [95], infrarrojo (940 nm, EL23G) [96], y PIN (HPI23G) [97], donados por la empresa Kodenshi, ya que son diodos de alta velocidad de conmutación y con bajas pérdidas. Para la construcción de cada una de ellas se ubicaron los diodos emisores (infrarrojo y rojo) y el diodo PIN de tal modo que se obtuvieran los niveles máximos de voltaje captados por este último. Además, de los elementos mencionados, se utilizaron materiales como: un gancho de ropa, un forro protector, cable *ribbon*, cable protegido contra señales interferentes, *fomy* y papel aluminio.

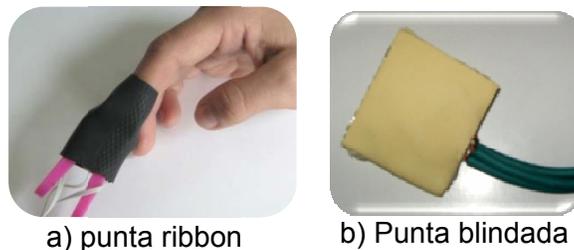


Fig. 39 Puntas de prueba

4.1.3.2 Módulo FR

El módulo diseñado para la frecuencia respiratoria se presenta en la figura 40. Su implementación utiliza un arreglo de cuatro amplificadores operacionales que cumplen las siguientes funciones: luego de un divisor de voltaje entre el termistor y una resistencia de $6.8k \Omega$, el voltaje que cae sobre el termistor es utilizado como señal de entrada para un amplificador en configuración de seguidor de voltaje (Bloque A) lo cual permite conectar otras etapas de procesamiento sin alterar su nivel; la salida del bloque A ingresa a dos etapas: la primera, un seguidor de señal (bloque B) y la segunda una red RC (bloque C) cuyo propósito es introducir un retardo a la señal AC si afectar el nivel DC que se adapta con el seguidor de voltaje D. La etapa final (bloque D) hace la diferenciación entre las

señales de los bloques B y C, eliminando el nivel DC de la señal y llevando a saturación y corte el amplificador de acuerdo a las variaciones AC. El condensador de 20u F filtra las variaciones de alta frecuencia. El amplificador seleccionado es el TLV2254 producido por Texas Instruments dado que es de muy bajo consumo de potencia (34 μ A por canal) y ruido.

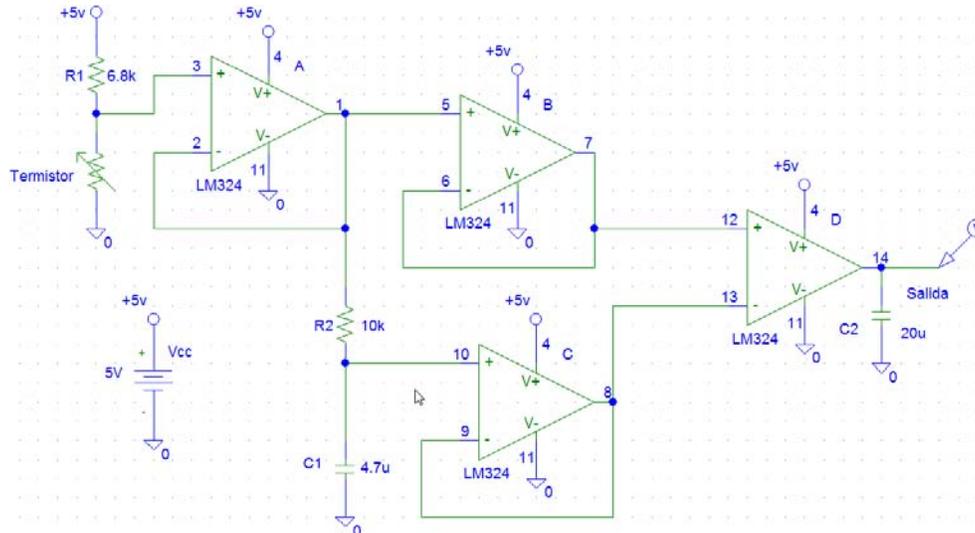


Fig. 40 Esquemático del módulo FR

4.1.3.3 Módulo cálculo FR, FC y SaO2

El módulo de cálculo de FC y FR es el encargado de procesar las señales recibidas del pulsoxímetro y el termistor con las cuales se calculan los valores de SaO₂, FC y FR. A continuación, se describe el procesamiento que se le hace a cada una de las señales.

Señal del pulsoxímetro: los diodos (rojo e infrarrojo) son multiplexados en el tiempo a 500 veces por segundo, con lo cual el diodo PIN es excitado alternadamente, este genera una corriente proporcional a la intensidad de luz reflejada, esta señal se divide en dos partes: (1) un componente pulsátil señal AC de alrededor de 10mVpp resultado de la modulación de la luz por las partes del cuerpo vinculadas al oxígeno, más el ruido de la luz ambiental y la red eléctrica presente a 50/60Hz, y (2) un componente no pulsátil, señal DC de alrededor de 1V generada por los tejidos del cuerpo vinculados a una menor oxigenación. Para determinar la SaO₂ se emplea la componente AC como resultado de la absorción de cada longitud de onda y se divide este valor por el correspondiente componente DC para obtener una relación de absorción añadida por cada pulsación (R), la cual es una función no lineal pero reproducible de la SaO₂, ecuación 1.

$$R' = \frac{\log(I_{ac})\lambda_1}{\log(I_{ac})\lambda_2} ; SaO_2 \propto R' \quad (1)$$

Donde λ_1 y λ_2 , representan las dos longitudes de onda utilizadas.

La medición de la FC se deriva del conteo de número de muestras presentes en tres pulsos y la tasa de muestro de 500 muestras por segundo, ecuación 2.

Señal del termistor: el procesamiento de la señal inicia cuando esta es muestreada a 10Hz por el conversor A/D del microcontrolador, las muestras son almacenadas en un vector de 93 posiciones. Una vez que el vector esta completo, se procede a encontrar dos picos máximos consecutivos de la señal con el objetivo de identificar la distancia entre ellos, figura 41. Finalmente, con esta distancia y el periodo de muestreo se realiza el cálculo de la FR, ecuación 3.

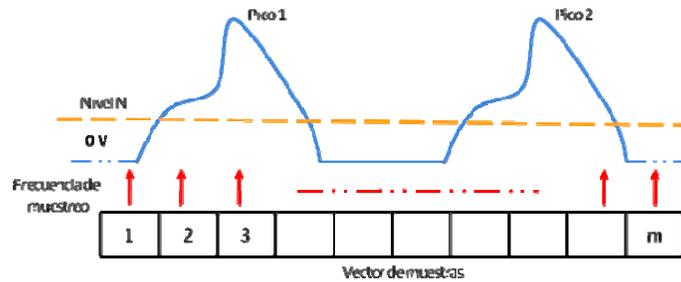


Fig. 41 Analogía del vector de muestras con la señal sensada del termistor

4.1.3.4 Módulo Clasificación

Es el encargado de clasificar al paciente a través de uno de los colores del código internacional de colores, donde cada uno de ellos establece la prioridad de atención que requiere el paciente, así rojo se considera como inmediata, amarillo como urgente y verde como tardía. El proceso de clasificación se realiza con base en el algoritmo START [98] que es un método sencillo, rápido de aplicar y con una alta sensibilidad en la detección de heridos graves, y los rangos presentados en la tabla 20 para cada uno de los signos objetivos.

Tabla 20 Rangos de los Signos vitales

Signo	Rango normal	Alteraciones
Frecuencia Cardíaca	60 – 100 [ppm]	Bradicardia < 60 [ppm]
		Taquicardia > 100 [ppm]
Frecuencia Respiratoria	12 – 20 [rpm]	Bradipnea < 12 [rpm]
		Hiperventilación > 20 [rpm]
Saturación de oxígeno	95 – 100 %	Tratamiento inmediato 90 – 95 %
		Enfermo grave < 90 %

En la figura 42, se presenta el algoritmo de clasificación propuesto, el cual parte de que el paciente respira y no considera el caso de respiración ausente a diferencia del START, dado que el socorrista evalúa la respiración como primera instancia y en caso de esta estar ausente, lo clasifica como negro o rojo dependiendo de la valoración de la vía aérea. A continuación, se describen cada uno de los posibles casos de clasificación.

Caso I: si FR es menor a 13 rpm, el paciente va a entrar a una situación de bradipnea. Por tanto, su prioridad de atención es inmediata (etiqueta roja).

Caso II: si FR está entre 13 y 20 rpm y la FC entre 60 y 100 ppm, se mide la SaO2, si esta es menor al 95% el paciente se clasifica como amarillo pero si esta es mayor a 95% entonces la clasificación es verde.

Caso III: si FR está entre 20 y 30 rpm, se evalúa la FC, si esta es mayor a 100ppm se clasifica al paciente como rojo, si está entre 60 y 100 ppm se clasifica como amarillo y si es menor a 60 ppm se valora la SaO2 y si esta es menor al 95 % el paciente es clasificado como rojo.

Caso IV: si FR es mayor a 30 rpm, se clasifica al paciente como rojo.

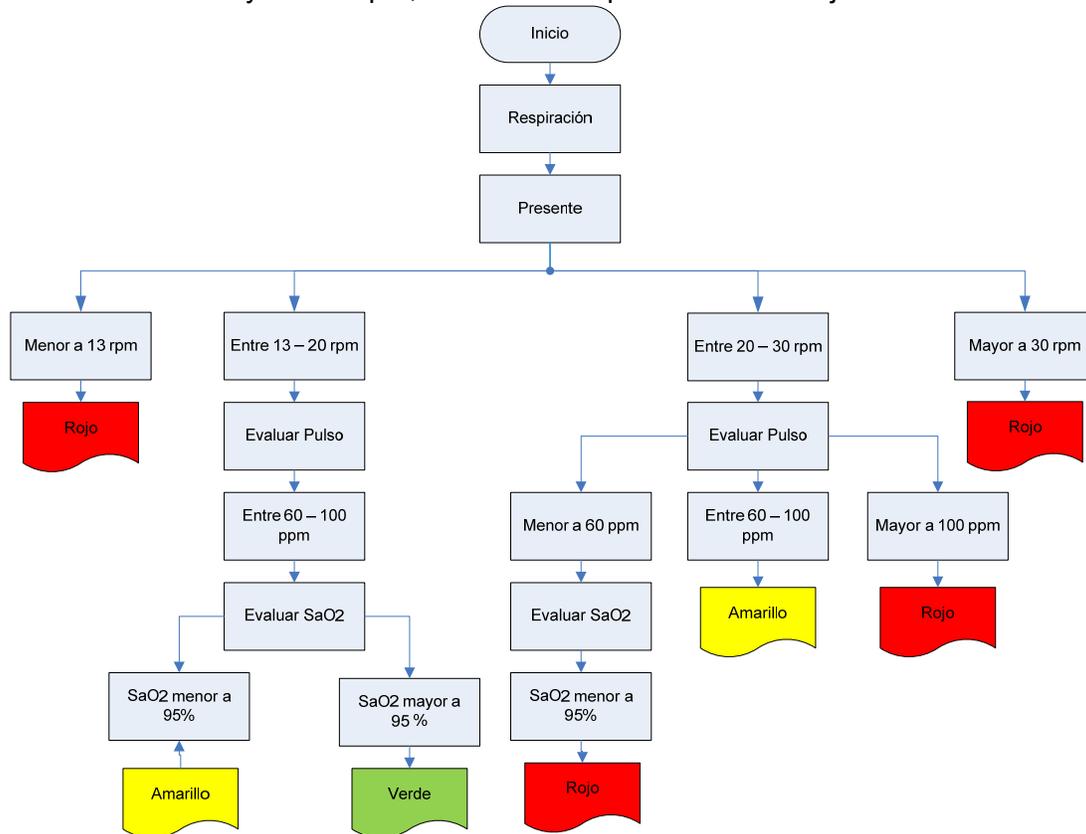


Fig. 42 Algoritmo para la clasificación del paciente

4.1.3.5 Módulo de transmisión

Este módulo se desarrolló con el fin de validar los resultados obtenidos por cada uno de los componentes hardware y software diseñados. Para su implementación se utilizó el integrado MAX3221 de TI que trabaja a velocidades mayores a 250 kbit/s y funciona como transmisor-receptor [99]. Este dispositivo se encarga de adecuar los niveles de voltaje CMOS (3V) entregados por el MSP430 y los transforma en niveles TTL que son los utilizados por el puerto serial.

4.1.3.6 Interfaz de despliegue

En la figura 43 se presenta la interfaz gráfica construida para visualizar la información de los signos vitales (FR, FC y SaO2) y la clasificación, en forma de columnas que varían su tamaño con respecto al dato recibido y su color dependiendo del rango en el que se

encuentra la información, así para el rango normal verde, rango intermedio amarillo y rango crítico rojo. El desarrollo se realizó en Visual Basic 6.0, por ser una plataforma que integra un gran conjunto de funcionalidades dirigidas al manejo del puerto serial del computador. De igual forma, se utilizó la librería *ChartDirector* [100] para la representación gráfica de los datos.

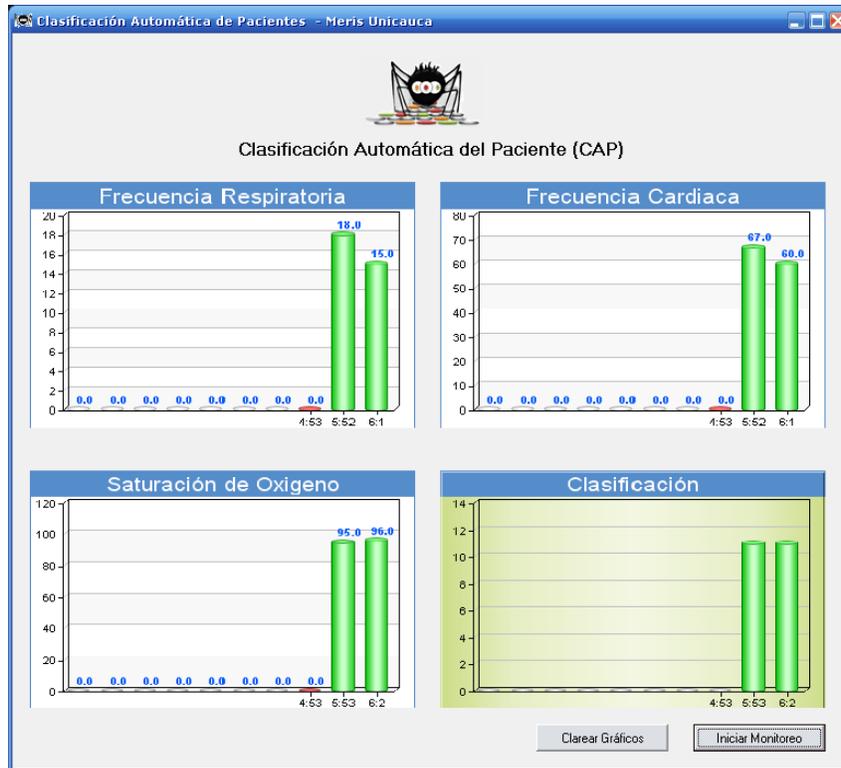


Fig. 43 Interfaz gráfica del bloque despliegue

4.1.4 Diseño de las placas

Para el diseño de los PCBs de las placas de sensado y procesamiento, se definieron las dimensiones que deberían tener tanto el ancho de la pista como el diámetro de las vías, teniendo en cuenta que el ancho de la pista debía ser lo suficientemente fina como para poder trazar todas las conexiones manteniendo la separación entre los elementos, y lo suficientemente amplia como para poder ejecutar las pistas con las herramientas disponibles en el CEI. En cuanto a las vías, se definen dos diámetros:

- El diámetro del taladro de la vía: el cual es el diámetro del agujero propiamente dicho, la limitación del tamaño no está impuesta por el diámetro de la broca, sino por la capacidad para lograr una buena metalización en agujeros pequeños. Por tanto, el CEI aconseja un diámetro de vía no inferior a 0,5 [mm] teniendo en cuenta su experiencia acumulada en la fabricación de los prototipos.
- El diámetro de la corona de la vía: la cual es la porción de metal que rodea el taladro de la vía, y que permite la conexión eléctrica entre la pista que llega a la vía y la propia vía. Esta debe ser lo mayor posible sin que interfiera en el correcto enrutado de la placa.

El diseño de los PCBs se realizaron con el programa ORCAD 9.0, el diseño de la placa de procesamiento se dificultó más que la de sensado dado que por una parte todas las conexiones debían ir al conector izquierdo teniendo en cuenta la distribución de las señales y por otra al ser una placa con conectores en sus dos caras y que todas las señales deben ser pasantes, existe una gran abundancia de vías en la zona de los conectores, lo que exige reducir al máximo posible las distancias. En la tabla 21 se presentan los valores de cada uno de los parámetros para cada una de las placas.

Tabla 21 Dimensiones en la placa de sensado

Característica	Sensado (mm)	Procesamiento (mm)
Ancho de pista	0.50	0.2
Diámetro de vía	0.50	0.5
Diámetro de corona de vía	1.00	1.00

En las figuras 44 se presenta el *layout* de la placa de sensado y en la figura 45 el *layout* de la placa de procesamiento.

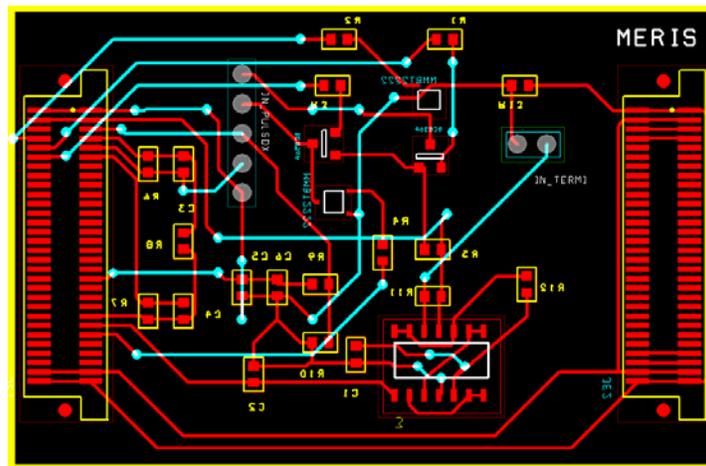


Fig. 44 Layout placa de sensado

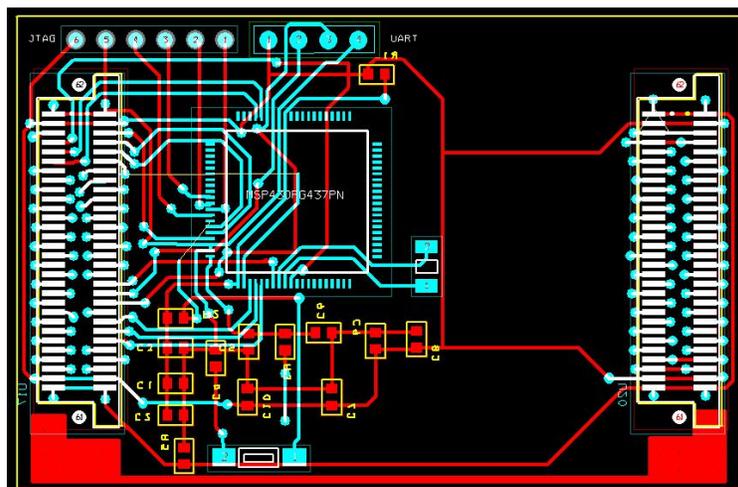


Fig. 45 Layout placa de procesamiento

4.2 Prototipo II: implementación de la arquitectura para aplicaciones RT

La implementación de la arquitectura de comunicación se realizó sobre la WSN de nodos IRIS empleando como entorno de desarrollo eclipse Galileo 3.5 y el *plugin* para NesC sobre el sistema Operativo Ubuntu 8.04; *TinyOS* 2.1 es el sistema operativo que corre sobre los nodos y la *Gateway*, para el desarrollo de la interfaz gráfica se empleó además Java 1.5, la librería Graphviz 2.0 y Grappa 1.2 que es librería java para el manejo de grafos.

Además, se utilizaron distintas librerías de *TinyOS* genéricas y otras especializadas para la plataforma IRIS y su módulo de Radio, por ejemplo la interfaz RF230Packet con la cual se captura el Índice de Potencia del Paquete RSSI, pero en ningún caso se trabajó con librerías especializadas para la tarea de asignación de tiempos, dado que no se encontraron referentes adecuados. Por otra parte, debido a que no fue posible comunicar los radios de los nodos (CEI e IRIS), los valores de los signos vitales se simulaban por medio de números aleatorios dentro de los rangos esperados para cada nodo, no obstante, el algoritmo de clasificación del paciente sí se implementó. El código fuente de los nodos de la red y la interfaz de datos, se encuentran comentados en el anexo de esta monografía.

En esta sección se presenta inicialmente las principales características de los nodos IRIS, luego la descripción de los protocolos Diseminador y Colector de *TinyOS*, los cuales sirvieron sólo para medir el alcance de la arquitectura de comunicación propuesta en este trabajo puesto que su adaptación para que garantizaran la entrega de los mensajes significaba un mayor esfuerzo que implementar una solución propia y finalmente se listan las especificaciones temporales definidas en la implementación.

4.2.1 IRIS

La Universidad ha adquirido la WSN IRIS de la empresa *Crossbow*, en la figura 46a se presenta un nodo de dicha red, el cual cuenta con un ATmega1281, 128kB de memoria de programa, 8 kB SRAM, un transceptor RF230 que trabaja en la frecuencia de 2400MHz con el protocolo 802.15.4 / *ZigBee* con una tasa de transferencia de datos máxima de 250kbps, alcance interno de 50m y externo mayor de 300m y hasta 500m en ambientes externos con línea de vista, se alimenta con 2 pilas AA, el tamaño del nodo es de 58×32×7mm, incluye tres leds (rojo, amarillo y verde) como interfaz de usuario, consume en modo activo 8mA e inactivo 8uA, tiene un precio de 132 dólares [101]. El nodo tiene integrado el sistema operativo *TinyOS*.

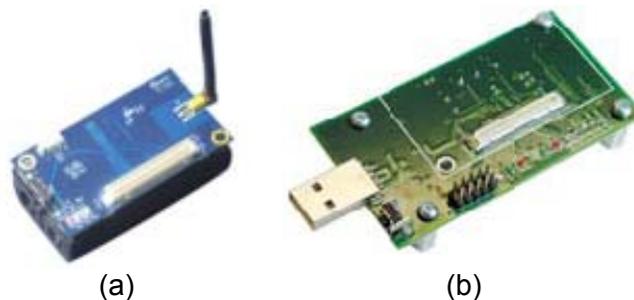


Fig. 46 (a) Nodo IRIS (b) Gateway MIB520.

El kit de desarrollo incluye la *Gateway MIB520CB* figura 46b, la cual a través de su interfaz USB provee comunicación bidireccional entre los nodos y una estación de computo. Además de la transferencia de datos, la MIB520CB también proporciona una interfaz de programación. Cualquier nodo puede funcionar como estación base al ser conectada a esta *Gateway*. Por otra parte, esta *Gateway* ofrece dos puertos separados, uno dedicado a la programación del nodo y otro para la comunicación de datos sobre USB, tiene un precio de 86 dólares [102]. Para cumplir la función de programador, se debe conectar el nodo mediante el puerto *Hirose*, y dar el comando de grabación:

```
make Iris install,1 mib520,/dev/ttyUSB0
```

Donde:

- *make*: Carga del proceso automatizado de grabación, que se encuentra en un archivo de configuración estandarizado.
- *Iris*: Indica el tipo de nodo de trabajo.
- *install*: selecciona el tipo de operación a realizar sobre el nodo.
- 1: Es el número que se desea asignar al nodo
- *mib520*: es el tipo de programador empleado.
- */dev/ttyUSB0*: es la dirección física del puerto al que se encuentra conectado el programador.

4.2.2 Protocolos: Diseminación y Colección de *TinyOS*

TinyOS ofrece los protocolos diseminación y colección para difundir y capturar los datos generados dentro de la WSN. A continuación, se describe cada uno de ellos y se justifica porque no fueron utilizados.

Diseminación (*Drip*) [103] es un protocolo básico de red de sensores basado en un algoritmo de inundación controlada llamado *trickle* [104], cuyo objetivo es entregar un dato a cada nodo de la red originado en la *Gateway*, que permite al administrador configurar, consultar y reprogramar la red, es decir, el protocolo emula el control de la red, pero no gestiona la congestión del tráfico. Sin embargo, los nodos implementan una serie de buffers que les permite poner en cola los mensajes que llegan o que están listos para salir, siendo prioritario el orden de llegada del mensaje. No obstante, esta característica no garantiza la entrega de los mensajes con menor plazo, al no estar este incluido dentro de los criterios de priorización aplicados para el envío de mensajes a la *Gateway*.

Colección [105] es un protocolo diseñado para transmitir paquetes de datos desde los nodos hasta el *Gateway*, siempre de hijo a padre. La elección de padre, se realiza a través del Indicador de Calidad de Enlace (LQI).

En general, se han detectado ciertas deficiencias en los protocolos de red que implementa *TinyOS* teniendo en cuenta las pruebas descritas en la sección 5.2.1. El principal problema detectado se encuentra en el estado de congestión de la red. Por el cual, existen pérdidas de paquetes (aunque escasas) cuando el tráfico circulante de la red está cargado de mensajes. No obstante, los protocolos de diseminación y colección serán empleados como referentes para verificar la propuesta de este trabajo de grado.

4.2.3 Especificaciones temporales de la implementación

En un escenario real de aplicación de MERIS, la generación de paquetes de los signos vitales del nodo variaría entre 1,63 y 24 segundos de acuerdo a los valores de FR y FC que están midiendo, como se aprecia en la tabla 22, teniendo en cuenta este rango se estableció para las pruebas que los nodos envíen información cada 2 segundos, con lo cual se estaría simulando el caso donde más se podrían encontrar inconvenientes a nivel de congestión en la red. El canal de transmisión utilizado es el 11, el cual es el configurado por defecto. Los valores consignados en la tabla 22 se obtuvieron al despejar una regla de tres para cada uno de los signos vitales, de las cuales se obtuvieron las siguientes ecuaciones:

$$\text{Tiempo para medir FC} = \left(\frac{60 \text{ seg}}{\text{número PPM}} \right) \times 6 \text{ pulsos}$$

$$\text{Tiempo para medir FR} = \left(\frac{60 \text{ seg}}{\text{número RPM}} \right) \times 2 \text{ respiraciones}$$

Tabla 22 Tiempo requerido para medir signos vitales

Signo,	rango	# de muestras	Valor	Triage	Tiempo requerido [seg]
FC y SaO2	20 a 220 ppm	6 pulsos	20	Rojo	18
			30	Rojo	12
			60	Verde	6
			120	Amarillo	3
			180	Rojo	2
			220	Rojo	1.63
FR	5 a 150 rpm	2 respiraciones	5	Rojo	24
			15	Verde	8
			20	Verde	6
			30	Amarillo	4
			40	Rojo	3
			60	Rojo	2

En la experimentación se encontró que la latencia promedio para que un mensaje llegue a la *Gateway* es de aproximadamente 20 mseg, este valor se tomo como el 1% del periodo de actividad requerido para que un mensaje llegue a la *Gateway*, con lo cual se obtuvo un periodo de activación de 2 segundos; dado que MERIS interacciona con personas con estado de salud crítico, no se considero el uso del periodo de inactividad porque este incrementa la latencia, por lo tanto la supertrama establecida quedo de 2 segundos.

Al tener un periodo de activación de 2 segundos, la *Gateway* puede recibir en una supertrama alrededor de 100 mensajes, lo cual garantiza que la red puede recibir información de por lo menos 100 nodos. Por otra parte, conociendo que en 5 mseg (prueba 4, sección 5.2.2.4) se envían 26 bytes (13 bytes del protocolo *ZigBee* y 13 bytes de carga útil), la red soporta una transferencia de datos de 41,6 Kbps.

Los plazos de los mensajes se fijaron teniendo en cuenta la clasificación del paciente dando el menor tiempo de plazo a los mensajes con información de clasificación como rojo, con el fin de darles mayor prioridad sobre los paquetes amarillos y verdes. Así los mensajes etiquetados como: Rojos se les dio el doble del tamaño del periodo de activación, es decir de 4 segundos, dado que se espera que si estos se generan en un nodo de segundo rango alcancen hacer el salto; a los amarillos un segundo más que los

rojos, es decir 5 segundos, para darle mayor tolerancia y los verdes, un segundo más que los amarillos, es decir 6 segundos.

Por otra parte, el valor de RSSI mínimo tolerado para que un nodo sea seleccionable como nodo puente se eligió de dos, valor con el cual se alcanza una distancia para el primer rango de aproximadamente de 40 a 50 metros.

4.3 Resumen

A continuación, se presenta en la figura 47 un diagrama que resume los conceptos con el desarrollo de los prototipos presentados en este capítulo, en forma de mapa mental.

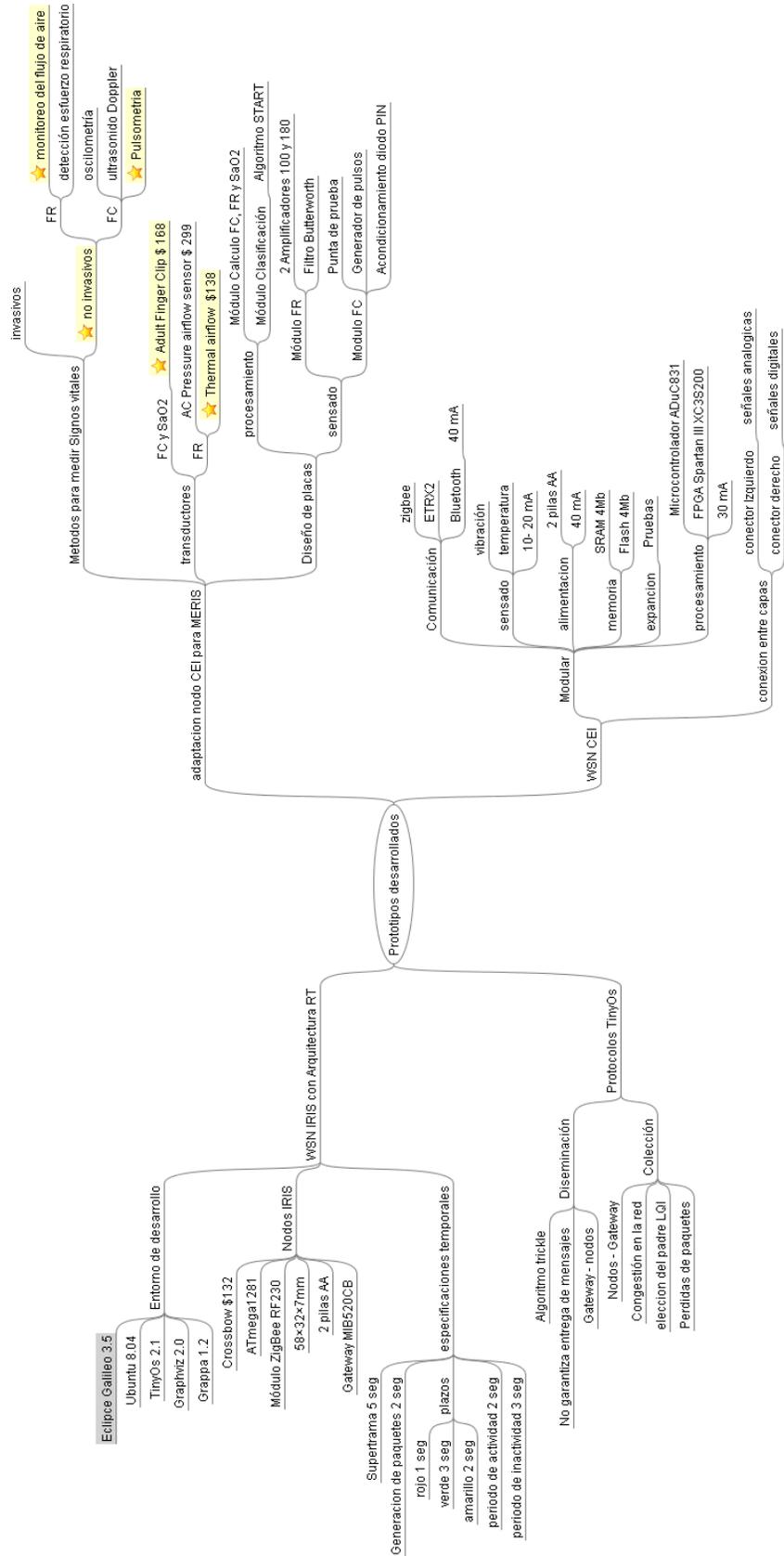


Fig. 47 Mapa conceptual capítulo IV

CAPÍTULO 5 EXPERIMENTACIÓN

Este capítulo se divide en dos secciones: la primera, contiene las pruebas realizadas para comprobar el correcto funcionamiento de la placa de sensado diseñada para el nodo CEI, las cuales se hicieron a nivel de módulos y de todo el sistema, midiendo el consumo de potencia de cada uno de ellos; la segunda sección, presenta las pruebas realizadas a la WSN IRIS enfocadas para determinar la fiabilidad, alcance y desempeño de la red, inicialmente para la WSN funcionando con los protocolos Diseminación y Colección de *TinyOS*, las cuales sirven como referencia para medir el alcance de la propuesta definida en este trabajo y luego con la implementación de la arquitectura de comunicación propuesta.

5.1 Pruebas a la placa de sensado y procesamiento

Las pruebas presentadas en esta sección no contaron con los sensores seleccionados, debido a que no fue posible coordinar con CEI de la UPM los recursos disponibles en el proyecto MERIS para la compra de los sensores, por lo tanto, se construyó una punta casera para el pulsoxímetro y se utilizó el termistor CB34P2 de la empresa *Fenwal Electronics* dado su disponibilidad en el laboratorio de la Universidad.

5.1.1 Módulo FC

Se realizaron seis pruebas para verificar el correcto funcionamiento del pulsoxímetro, las dos primeras dirigidas al generador de pulsos conformado por un puente H y el conversor análogo digital de las cuales se pudo observar que el diseño del generador de pulsos propuesto por Texas Instruments no entregaba las señales esperadas por tanto se modificó como se presenta en la figura 48.

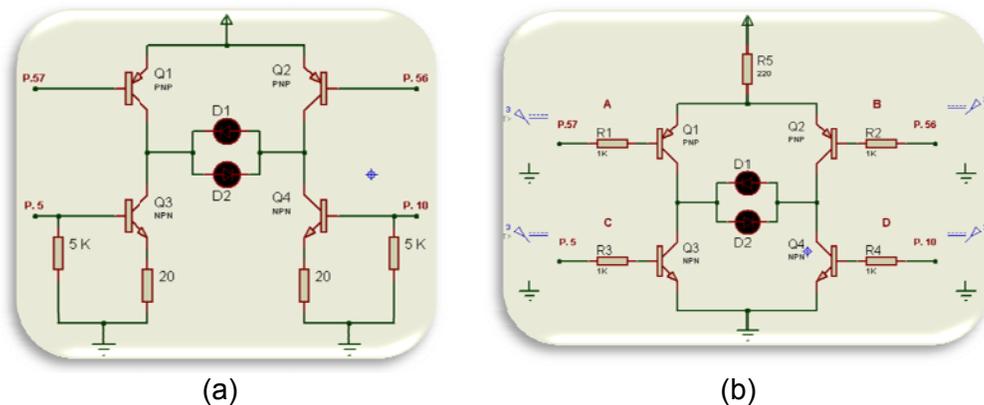


Fig. 48 (a) Puente H propuesto por TI (b) Puente H implementado

La siguiente prueba fue a las puntas del pulsoxímetro donde se evidenció que la punta blindada brinda una mejor señal en comparación con la punta *Ribbon* (figura 49, osciloscopio configurado a 0.2 V/división), las otras pruebas se realizaron para comprobar el correcto funcionamiento de la etapa de amplificación con ganancia de 16 veces, el filtro FIR digital y la cuantificación de la señal de entrada expresada como FC y SaO₂, las cuales arrojaron los resultados esperados.

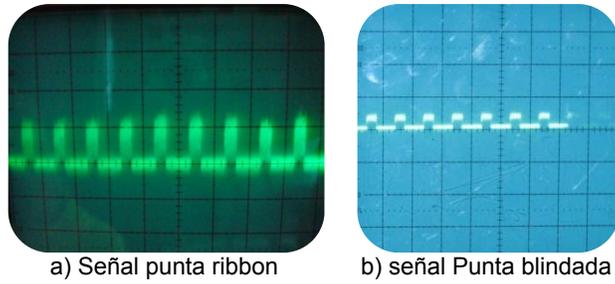


Fig. 49 Señales de salida de las puntas de prueba

5.1.2 Módulo FR

Para las pruebas de este modulo se empleó el termistor CB34P2 de la empresa *Fenwal Electronics*. Se inicio montado el circuito diseñado para este módulo a continuación se respiro sobre el termistor y se capturo los valores del vector de muestras con ayuda de la herramienta de depuración IAR Systems los cuales permitieron visualizar la señal antes su procesamiento lógico, además se verificó los valores registrados de FR sobre la herramienta. En este documento se consignan los valores obtenidos en dos pruebas, así en la figura 50 se presentan en el eje Y los valores que toman cada una de las 91 posiciones del vector de muestras y en las figuras 51 y 52 los calculados por el algoritmo para la medición FR. Los valores obtenidos se contrastaron con una verificación manual teniendo un grado precisión cerca del 95%. Por lo cual se concluye que el módulo diseñado es adecuado para la medición de la frecuencia respiratoria de una persona.

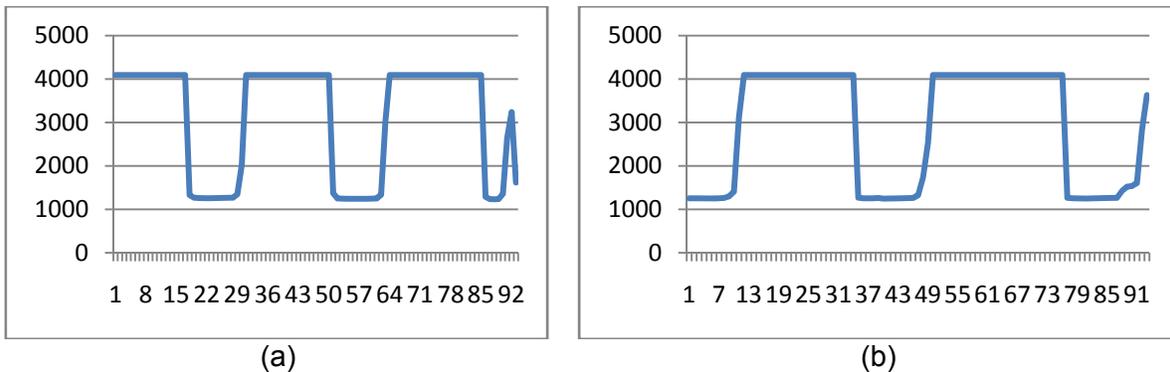


Fig. 50 Valores del Vector de muestras para FR igual (a) 21 y (b) 17 RPM

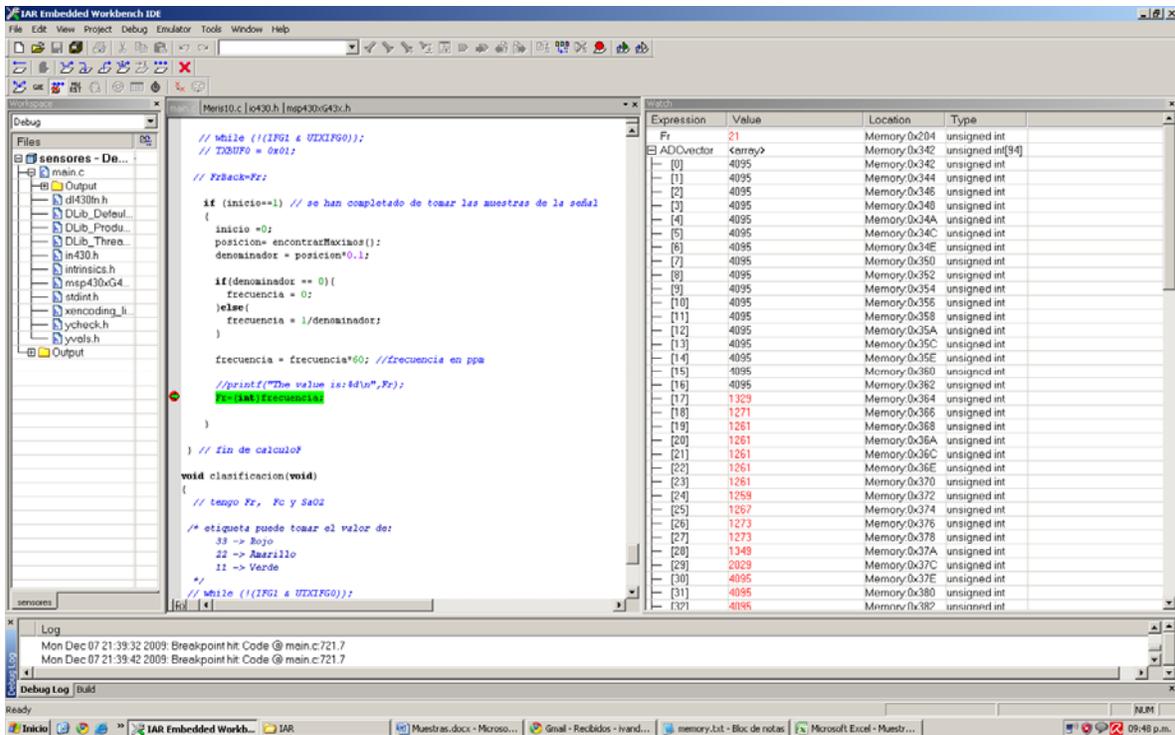


Fig. 51 FR visualizada en la herramienta de depuración IAR Systems

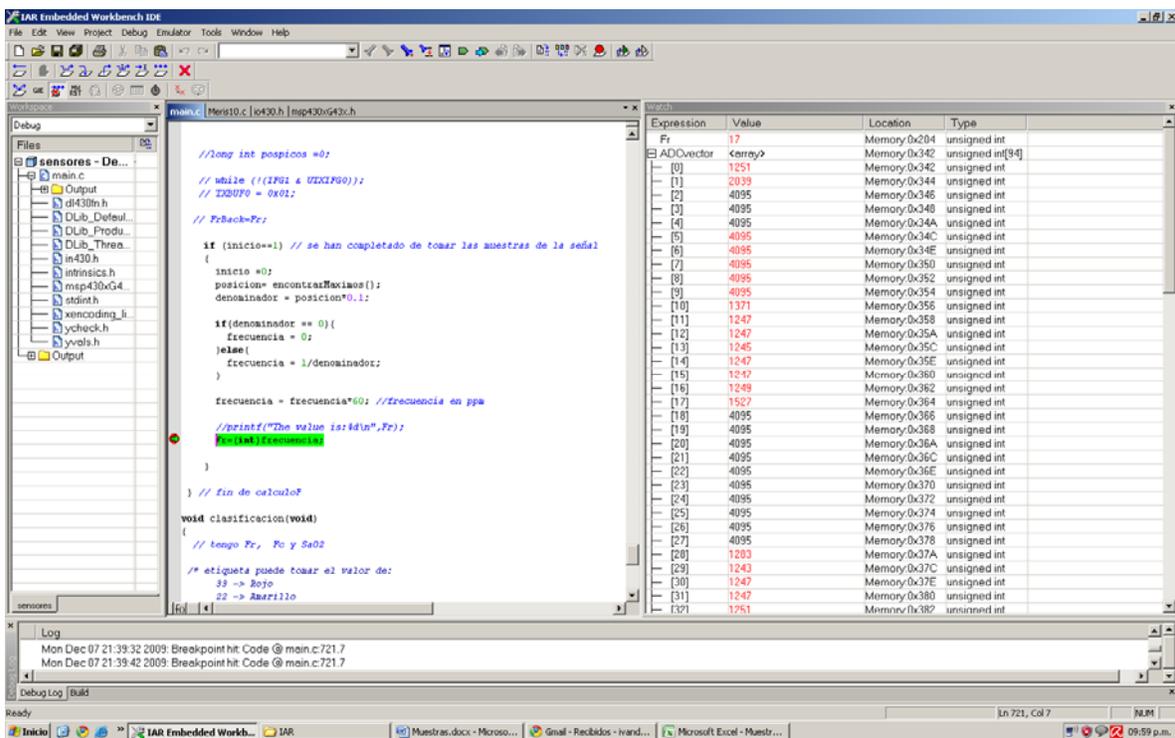


Fig. 52 FR visualizada en la herramienta de depuración IAR Systems

5.1.3 Módulo calculo de FC y FR, y Clasificación

Para comprobar el correcto funcionamiento de estos módulos se requirió integrar todos los módulos construidos, a continuación al sistema se le inyecto la señal del pulsoxímetro proveniente de la punta *Ribbon* y la señal de entrada del termistor (figura 53), y se visualizó los valores de cada uno de los parámetros en la interfaz grafica, los cuales correspondían a los valores visualizados en la herramienta de depuración IAR Systems (figura 54) donde el valor de la etiqueta (11) corresponde a una clasificación verde.

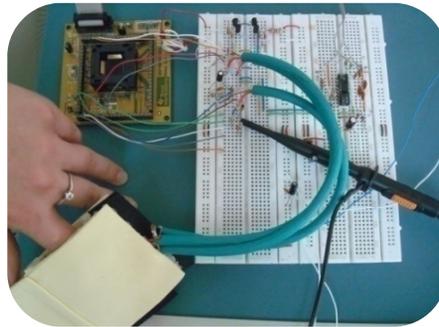


Fig. 53 Montaje de etapa de prueba

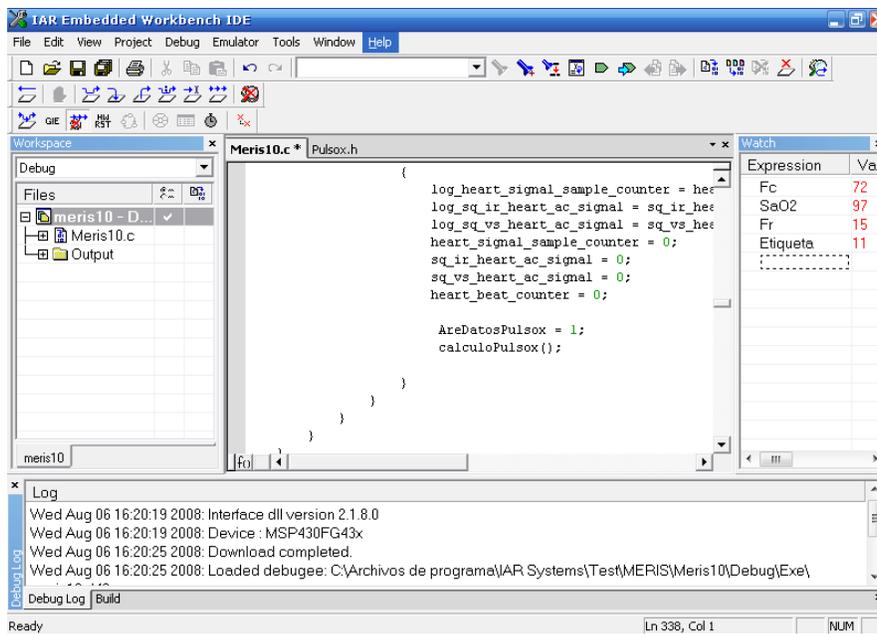


Fig. 54 Valores de FR, FC, SaO2 y clasificación visualizados en la herramienta de depuración IAR Systems

5.1.4 Consumo de potencia del sistema.

Se realizaron tres pruebas para medir el consumo de potencia del sistema de sensado en los modos activo y de bajo consumo (*LMP0*, *Low Power Mode 0*), la primera se efectuó sólo conectando el módulo FC, la segunda únicamente el módulo FR y la tercera conectando los dos bloques mencionados anteriormente, tabla 23.

Tabla 23 Consumo de potencia de los módulos

Módulo	Modo Activo (mA)	Bajo consumo (mA)
FC	11,86	11,23
FR	2,69	0,8
FC y FR	11,99	11,11

5.2 Pruebas a la WSN IRIS

Las pruebas de esta sección están enfocadas para determinar la fiabilidad, alcance y desempeño de la WSN, funcionando tanto con los protocolos Diseminación y Colección de *TinyOS* como con la implementación de la arquitectura de comunicación propuesta. Con el fin de que la primera sirva como punto de comparación a la segunda. Las pruebas se efectuaron a lo largo de una calle de un barrio con mediano tráfico de automóviles.

5.2.1 Pruebas a la WSN con los protocolos Diseminación y Colección

Las pruebas se realizaron en tres escenarios, los cuales difieren entre sí respecto a la cantidad de nodos que integran la red y su ubicación relativa a la *Gateway*. En el primer escenario, se ubico un solo nodo a 10 metros de la *Gateway* figura 55a, en el segundo se situaron 6 nodos dispersos en un área de 4 x 10 metros como se presenta en la figura 55b y en el tercero, se ubicaron 6 nodos dentro del área de cobertura de la red para dos rangos figura 56c, dado que no conocía cual era la medida del primero y segundo rango de cobertura se realizó primero su definición como se describe a continuación: (1) calculo el primer rango, para lo cual se ubico un nodo a 30 metros de la *Gateway* y se intercambió información con esta por dos minutos, después se traslado el nodo 10 metros más y de nuevo se enviaron los mensajes eco, y se repitió este procedimiento hasta 80 metros y luego cada 5 metros hasta 95 metros, figura 56a; (2) cálculo el segundo rango, primero se fijo un nodo en el límite del primer rango (50 metros) para servir de puente y después se ubico un segundo nodo cada 5 o 10 metros a partir de 50 metros hasta llegar a los 95 metros figura 56b, en cada estación el nodo permaneció un periodo de tiempo no menor a 2 minutos para recoger por lo menos 1000 muestras.

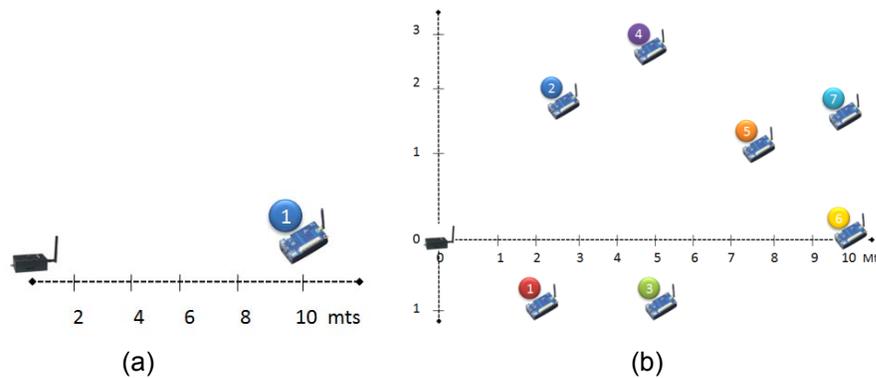


Fig. 55 (a) Escenario 1 y (b) Escenario 2

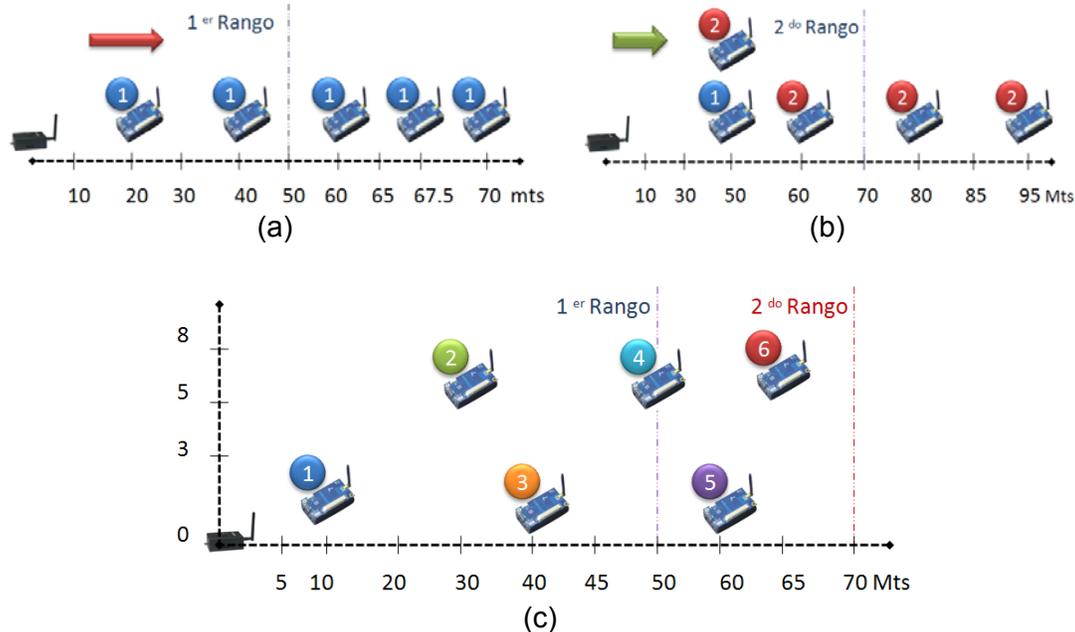


Fig. 56 Escenario 3 (a) fase 1, (b) fase 2 (c) y fase 3.

Para cada uno de los escenarios se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

1. Latencia promedio del canal de comunicaciones. Para obtener esta medida la *Gateway* envía mensajes marcados con su estampa de tiempo local a todos los nodos de la red, una vez recibido el mensaje el nodo realiza un eco de la información hacia la *Gateway* agregando su identificación; luego, que la *Gateway* recibe el mensaje eco captura de nuevo su tiempo local, y estima la latencia como la diferencia de estos dos valores. Dado que el cálculo de la latencia se realiza en la *Gateway* este valor representa el retardo del paquete en ir y volver a ella.
2. Fiabilidad de la red, vista como el porcentaje de paquetes eco que llegan a la *Gateway* según los enviados por esta. Para su medición se empleó un contador de mensajes enviados por la *Gateway* y un contador de mensajes eco en la *Gateway* por cada nodo que participa en la red.
3. Secuencia de los mensajes, definida como el porcentaje de mensajes que llegan en orden a la *Gateway*, para su medida se verifica que la diferencia entre dos números de secuencia consecutivos por cada nodo sea igual a 1.
4. Variación del Indicador de fuerza de señal de recepción denominado RSSI por sus siglas en inglés *Receive Signal Strength Indication*. Este término permite medir el nivel de fuerza de las señales recibidas; para el radio RF230 integrado en los nodos IRIS el RSSI tiene como valor máximo 28 y mínimo 1.

A continuación, se describen cada una de las pruebas realizadas a través de su objetivo, procedimiento ejecutado, resultados obtenidos, observaciones pertinentes y finalmente se enuncia la conclusión.

5.2.1.1 Prueba 1: WSN con un nodo, escenario 1

Objetivo: analizar cuál es el comportamiento de la red conformada por un solo nodo, variando la frecuencia de envío de paquetes desde 200 milisegundos hasta 2 segundos.

Procedimiento: se ubico el nodo a 10 metros de distancia de la *Gateway*, luego se enviaron 1000 paquetes desde la *Gateway* por cada frecuencia objetivo y se midieron los 4 parámetros de interés.

Resultados: en la figura 57, se presenta la grafica del comportamiento de la latencia a diferentes frecuencias de envío de paquete, la cual muestra que entre mayor sea la separación entre envío de paquetes, la latencia se reduce hasta alcanzar un valor mínimo asintótico de aproximadamente 11msg. De los datos encontrados, se puede considerar que a la frecuencia de 500msg, el valor de latencia alcanza un nivel aceptable de tolerancia. Por lo que esta frecuencia será considerada para próximas pruebas.

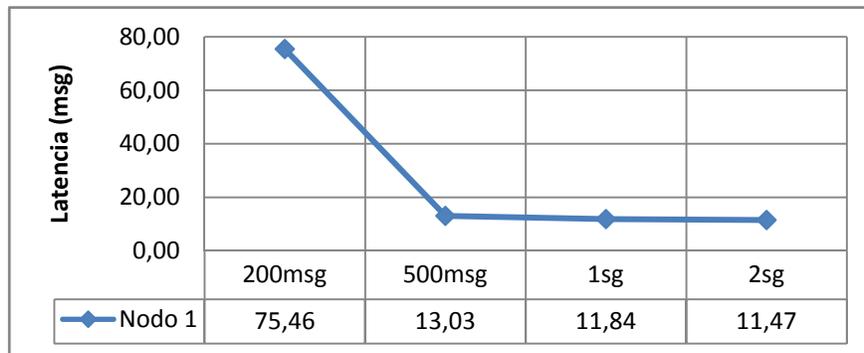


Fig. 57 Latencia del Nodo a diferentes frecuencias de Paquete.

Del análisis de la figura 57, se relaciona el porcentaje de paquetes cuya latencia fue menor que la frecuencia de envío figura 58, de la cual se observa que a partir de la frecuencia de 500 milisegundos todos los mensajes tienen una latencia menor a su frecuencia.

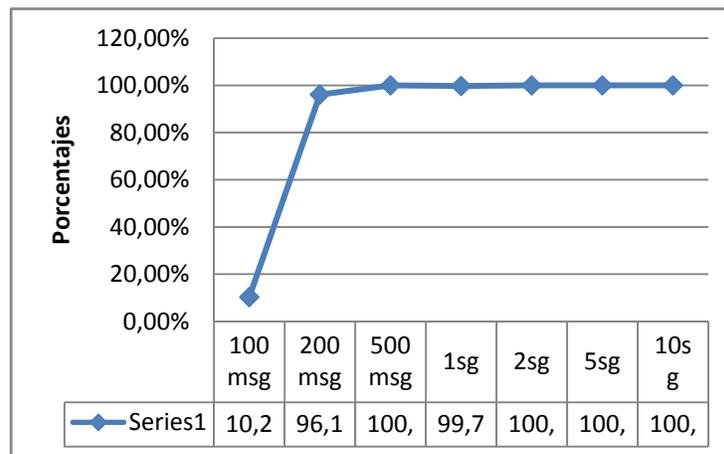


Fig. 58 Porcentaje de paquetes cuya latencia fue menor que la frecuencia de envío.

La fiabilidad de paquete está dada por el porcentaje de mensajes recibidos con éxito en la Gateway. La figura 59, muestra como la fiabilidad luego de 500msg fluctúa ente el 99% y 100%, siendo notoria que para frecuencias inferiores, el porcentaje de pérdida de paquetes decae con rapidez.

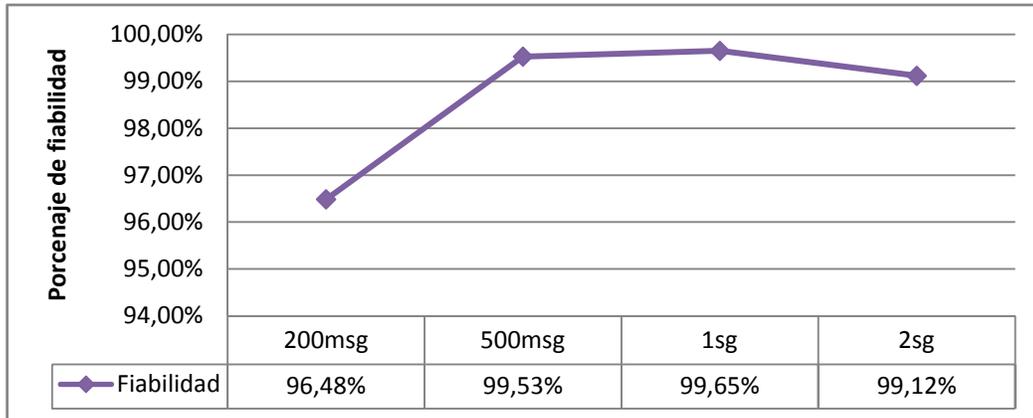


Fig. 59 Fiabilidad en la transmisión a diferentes frecuencias de paquete

El valor RSSI se comportó de manera estable para las diferentes frecuencias manteniendo su nivel entre 5 y 5.09 figura 60, por lo cual, para esta prueba, muestra ser un parámetro adecuado para estimar la distancia a la cual se encuentra el nodo.

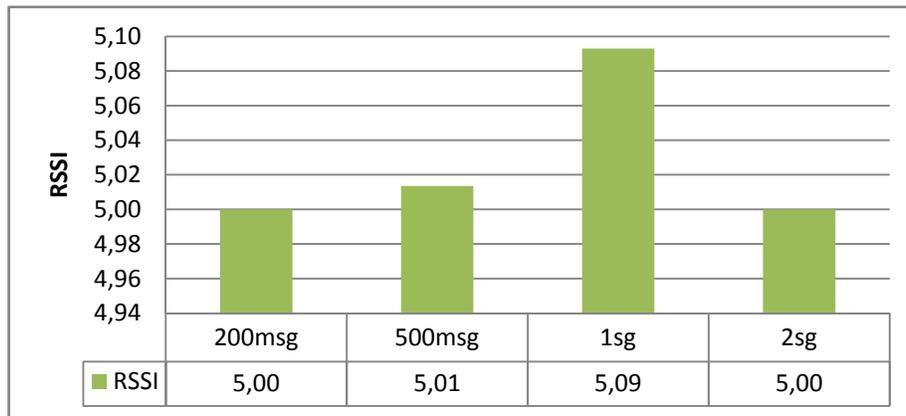


Fig. 60 Comportamiento del RSSI de los paquetes recibidos

Por otra parte, el porcentaje de paquetes con errores de secuencia se evaluó observando las relaciones entre estampas de tiempo durante el envío y recepción del paquete. En el momento que la marca anterior al paquete recibido resultaba menor, se marcaba como un paquete fuera de secuencia. Este fenómeno puede suceder por diferentes razones, pero las principales observadas fueron:

- La Gateway recibe dos veces la misma información, es decir, se encontraron paquetes duplicados en la recepción de la Gateway pero con un segundo de diferencia en la llegada, se considera que este fenómeno puede ocurrir por multitrayectoria donde el mensaje duplicado llega con suficiente potencia como para ser detectado como un nuevo mensaje.

- La *Gateway* envía dos veces la misma información, es decir, los paquetes con un mismo número de secuencia pero con estampas de tiempo diferentes por lo cual el nodo cliente envía dos paquetes de respuesta con diferente número de recepción.

La figura 61, muestra que este fenómeno si bien no es muy frecuente, se presenta como en un esquema aparentemente aleatorio.

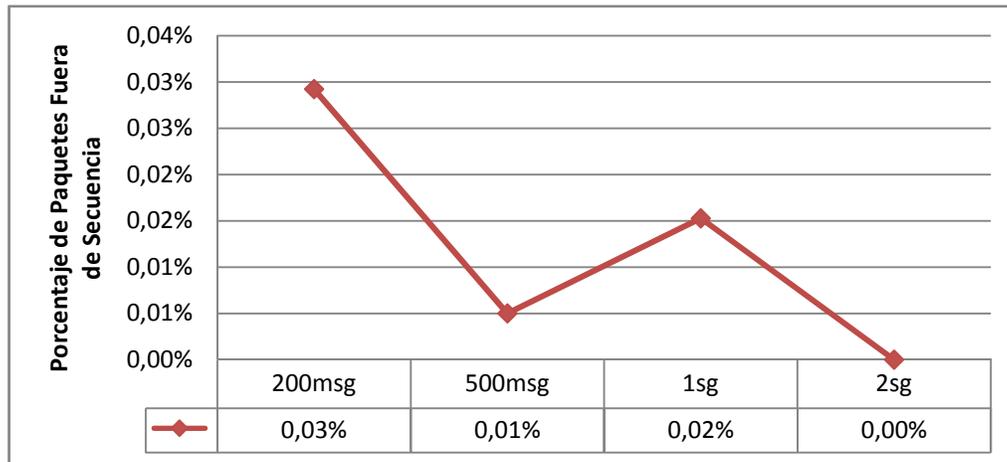


Fig. 61 Porcentajes de paquetes con errores de secuencia

Conclusión: en este escenario se observa que a frecuencias menores de 500msg la fiabilidad de las comunicaciones decae con rapidez, pero también aumentan el valor de la latencia promedio y porcentaje de pérdida de secuencia. Por lo tanto, se recomienda no aumentar la frecuencia de envío de paquetes superior a los 500 msg cuando se emplean estos protocolos. Por lo cual, las siguientes pruebas se harán a una frecuencia de envío de mensajes por parte de la *Gateway* fija de 500 milisegundos.

Por otra parte, el parámetro RSSI resulta en un parámetro estable con el cual se podría estimar la distancia de la fuente.

5.2.1.2 Prueba 2: Desempeño WSN con siete nodos en el primer rango de cobertura.

Objetivo: analizar el comportamiento de la WSN conformada por siete nodos a través de los parámetros descritos (latencia, fiabilidad, RSSI, mensajes fuera de secuencia).

Procedimiento: para esta prueba se ubicaron los siete nodos, en un área de 10 X 4 metros, como se presenta en la figura 56b, luego se enviaron un total de 1000 mensajes con una frecuencia de 500 mseg.

Resultados: En la figura 62, se ilustra el comportamiento estadístico de la latencia para cada nodo de los 7 que conforman la red, en la cual se puede observar que el valor promedio de latencia se incremento en comparación a la obtenida cuando a la WSN se conecto un solo nodo (11 mseg, figura 57).

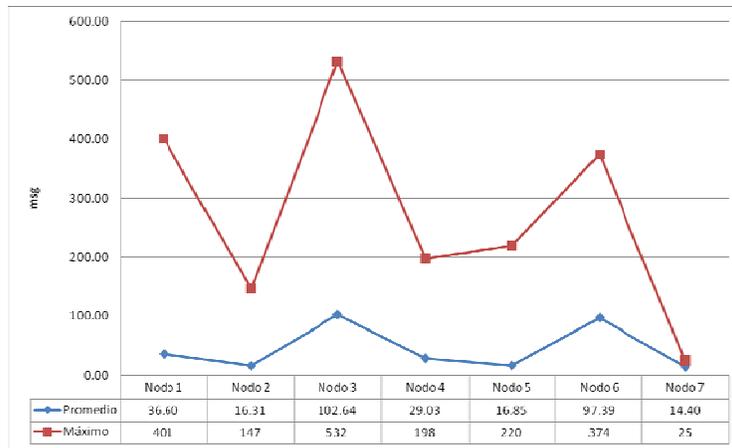


Fig. 62 Latencia promedio con 7 nodos

Para obtener mayor claridad sobre este fenómeno, se fueron apagando uno a uno los nodos para determinar cambios en los distintos parámetros en función de los nodos vecinos, estos fueron los resultados encontrados:

- La latencia se incrementa directamente con el número de nodos presente en la red, figura 63.

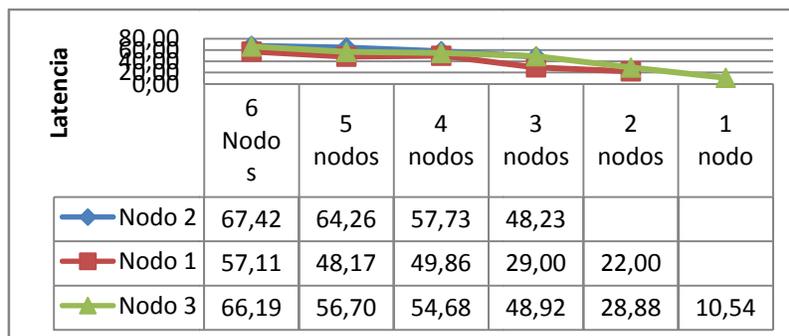


Fig. 63 Comportamiento de la latencia en función del número de nodos

- En cuando a la fiabilidad de la red este dato se mantuvo en rangos superiores al 98%, pero siendo también notoria la duplicidad en la recepción de paquetes, figura 64.

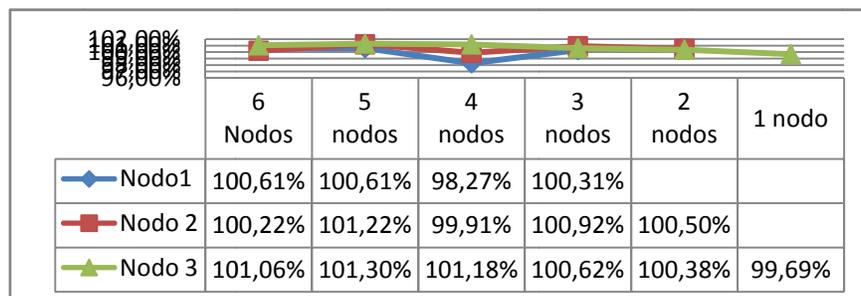


Fig. 64 Fiabilidad en la comunicación de la Red

- La pérdida de secuencia presenta un valor variante pero en definitiva es mayor entre más nodos hay en la red, figura 65.

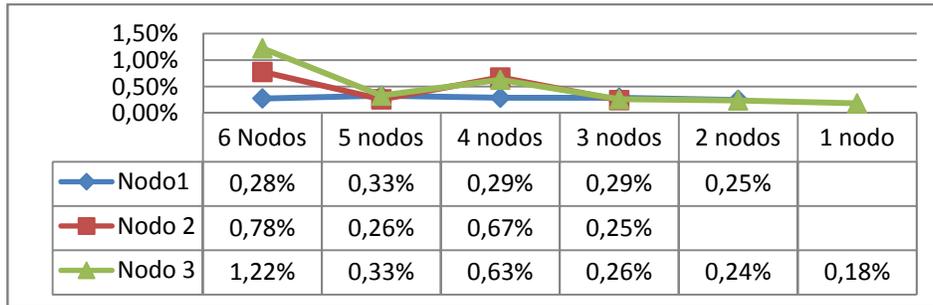


Fig. 65 Porcentaje de paquetes con pérdida de secuencia

Conclusión: cuando se aumenta el número de nodos en la red se incrementan: el valor promedio de latencia, el número de mensajes duplicados y la pérdida de secuencia, es decir que el desempeño de la red se ve afectada por la cantidad de nodos que la conforman.

5.2.1.3 Prueba 3: Desempeño WSN en dos rangos de cobertura.

Objetivo: definir el primero y segundo rango de cobertura teniendo en cuenta como criterio la fiabilidad de la red además de investigar el comportamiento de la WSN con seis nodos dentro del área correspondiente a dos rangos de cobertura.

Procedimiento: se realizaron los pasos ilustrados en la figura 56, esta prueba se realizó en un ambiente *outdoor* (calle de un barrio) con una frecuencia de envío de mensajes fija en 500 milisegundos.

Resultados: Medida del primer rango de cobertura: la figura 66 muestra que luego de 50 metros la fiabilidad del sistema inicia un descenso que supera las expectativas de la comunicación, por lo cual se estima a este valor como la distancia máxima para el primer rango de comunicación. Por otra parte, para esta medida se encontró que al igual que los anteriores escenarios el porcentaje de pérdida de secuencia de los mensajes permaneció en rangos bajos y con un comportamiento aleatorio.

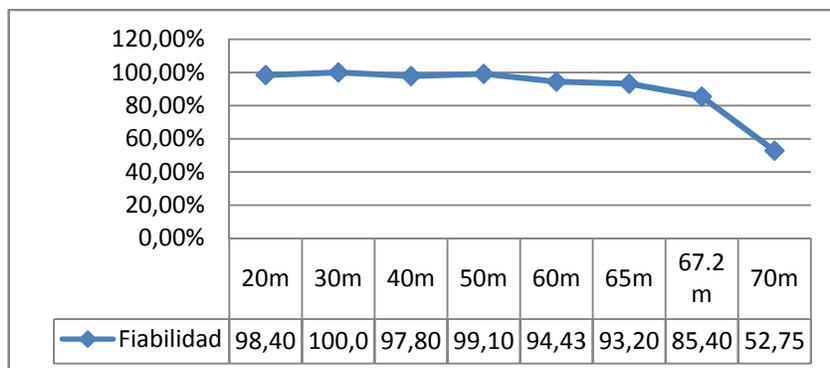


Fig. 66 Fiabilidad en la comunicación en función de la distancia del nodo

Medida del segundo rango de cobertura: en esta prueba se encontró que la fiabilidad bajo considerablemente luego de 30 metros figura 67, es decir, cuando los nodos estaban ubicados el primero a 50 metros y el segundo en 70 metros. Por lo tanto, se considera que el segundo rango de cobertura tiene como distancia máxima 70 metros desde la Gateway.

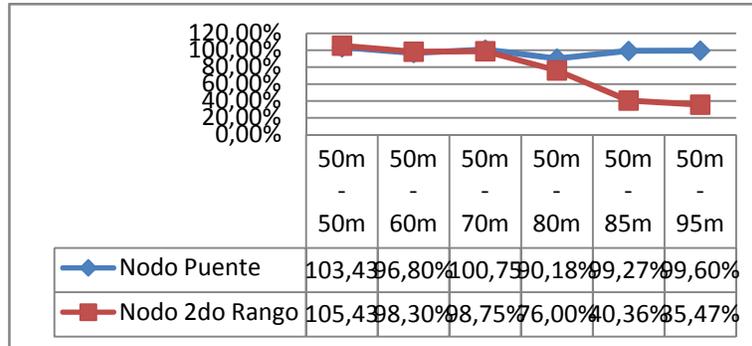


Fig. 67 Grafico de fiabilidad de la red para segundo rango de cobertura

Por otra parte la pérdida de secuencia de los paquetes se comporta de la misma forma que en escenarios anteriores, figura 68.

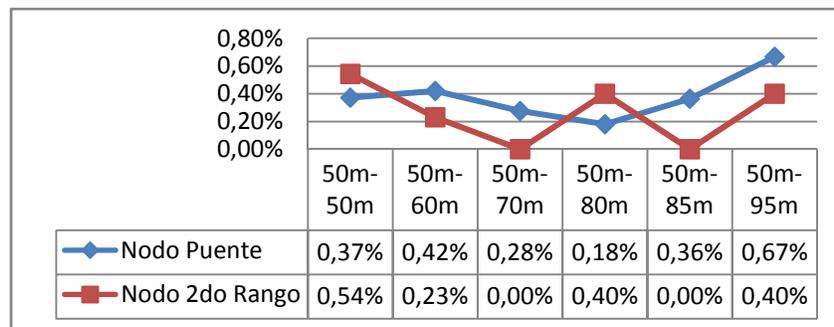


Fig. 68 Perdida de secuencia escenario 2

Desempeño red con seis nodos con multisalto: al observar la figura 69, se presenta que la latencia en los nodos uno y dos, se vio incrementada considerablemente por estar ubicados en el segundo rango de cobertura, comparada con la latencia promedio de los paquetes del nodo 3, ubicado a 10 metros (primer rango).

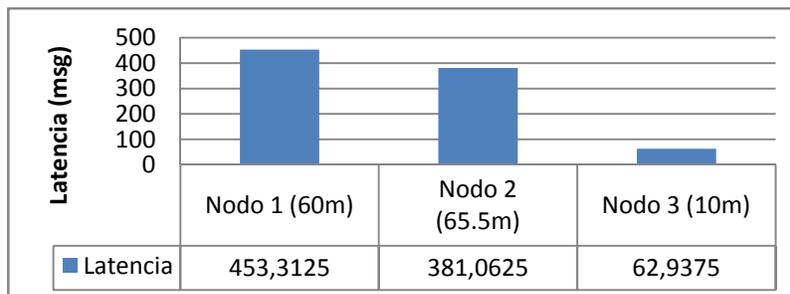


Fig. 69 Latencia para la red en un escenario multisalto

Los valores de fiabilidad de la red permanecieron dentro de los rangos esperados, aunque se vio un mejor desempeño sobre los nodos de primer rango, figura 70.

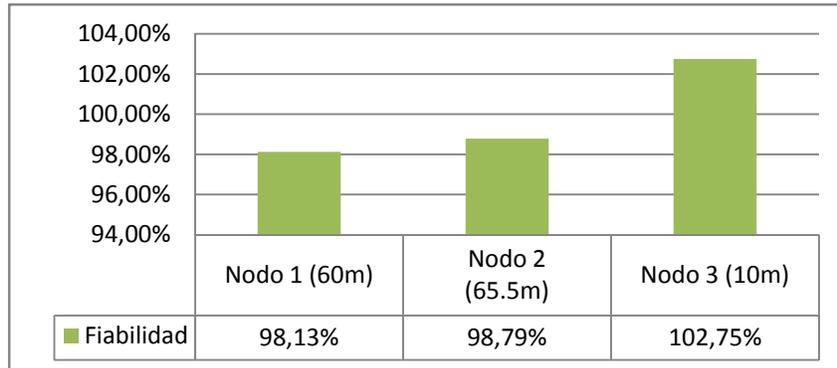


Fig. 70 Fiabilidad de la red en un escenario multisalto

Los nodos de segundo rango presentaron mayores errores de secuencia que los nodos de primer rango, figura 71.

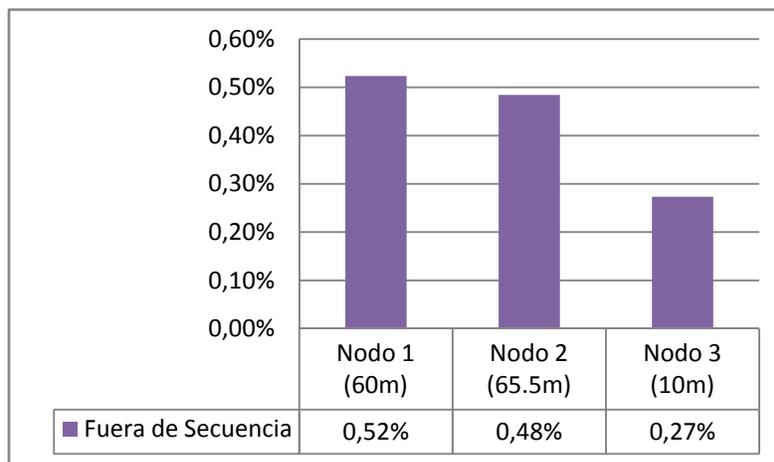


Fig. 71 Pérdida de secuencia en un escenario multisalto.

Conclusión:

- La latencia promedio en el canal de comunicación aumento con la distancia y esta es mayor al aumentar el número de nodos que participan en la red.
- La latencia para nodos de segundo rango es más del doble que la considerada para los nodos de primer rango, por tanto difícilmente se puede llevar a cabo una sincronización de la información desde la *Gateway* en la transmisión de estos nodos y deberán implementarse mecanismos de control que garanticen un manejo homogéneo de los nodos así estén en primer o segundo rango.
- Los errores de pérdida de secuencia se presentan en todos los escenarios en un esquema aleatorio, por tanto deberá ser considerada en los mecanismos de control que se implementen.

- La fiabilidad en la comunicación para nodos de segundo rango fue menor de la esperada (el doble del primer rango). Asumimos que este fenómeno se presenta por la acumulación de latencia y la falta de mecanismos para la administración adecuada del espectro y que un nodo no presenta los mismos niveles de alcance que la *Gateway*.
- La frecuencia de paquetes afecta los parámetros de latencia y fiabilidad, tal que entre mayor distanciamiento haya entre paquetes, estos tienen a llegar en rangos de latencia regulares, pero cuando la frecuencia se incrementa, con ella lo hace la latencia promedio y decae la fiabilidad de la comunicación.
- A frecuencias de paquete altas, los nodos más cercanos a la red tienden a monopolizar el canal y provocan pérdidas de fiabilidad muy altas en nodos más lejanos. Por tanto sin un mecanismo de control del uso del medio, se encontró que para la red IRIS de CROSSBOW, la frecuencia máxima recomendada para el envío de paquetes es de 1 cada 500msg.

5.2.2 Pruebas a la WSN con la implementación propuesta

En esta sección se presentan un conjunto de pruebas que permiten por una parte, verificar que el funcionamiento del prototipo implementado está acorde a la arquitectura propuesta en el capítulo 3 de esta monografía y por otra comparar estos resultados con los obtenidos cuando la WSN funciona con los protocolos Diseminación y Colección de *TinyOS*, para lo cual se replicó el escenario 2, es decir, seis nodos en el primer rango de cobertura, sin embargo solo se midieron los parámetros de latencia y fiabilidad, dado que la variación en el RSSI no depende de la arquitectura de red sino de la distancia a la que se encuentra el nodo a la *Gateway*.

Para obtener la medida de la latencia promedio del canal de comunicaciones, se enviaron mensajes desde el nodo hacia la *Gateway*, con el tiempo local del nodo y su identificador, la *Gateway* al recibir el mensaje toma su tiempo local y el valor del *Offset* almacenado en la tabla de vecinos para cada nodo y estima con estos la latencia. A diferencia de las pruebas realizadas en la sección anterior donde el valor encontrado de la latencia representa el tiempo en que el mensaje va al nodo y regresaba a la *Gateway*, en estas pruebas este valor solo es de un trayecto, es decir, del nodo a la *Gateway*.

La fiabilidad de la red, se midió teniendo en cuenta el número de paquetes enviados a la *Gateway* y los generados por el nodo, los cuales se obtuvieron al enviar en el campo de SaO2 un número de secuencia de mensajes, esta misma condición permitió verificar el número de mensajes que llegaron fuera de secuencia.

Las distancias encontradas para el primero y segundo rango en la prueba 5.2.1.3 (Desempeño de la red con dos rangos de cobertura) son similares a los encontrados para esta experimentación dado que las dos WSN tienen el mismo desempeño cuando a la *Gateway* se le conecta directamente un solo nodo. A continuación, se describen cada una de las pruebas realizadas a través de su objetivo, procedimiento ejecutado, resultados obtenidos, observaciones pertinentes y finalmente se enuncia la conclusión.

5.2.2.1 Prueba 1: Sincronización de nodos de primer rango por parte de la *Gateway*

Objetivo: verificar que la *Gateway* sincroniza los nodos de primer rango.

Procedimiento: para esta prueba se ubicaron siete nodos en un área de 10 X 4 metros, luego se encendieron todos y se fueron apagando uno a uno hasta dejar solo uno, en la figura 72 se puede visualizar como se representa gráficamente el apagado del nodo 5, para cada fase de la prueba se enviaron un total de 500 mensajes y se verificó en la interfaz de la estación base que la asignación de los intervalos de tiempo de transmisión para todos los nodos de la red fue igual a 98 % entre el número de nodos activos, ecuación que se aplica cuando los nodos generan los paquetes a la misma frecuencia y se encuentran todos en el primer rango, es decir, no deben enviar información de nodos de segundo rango.

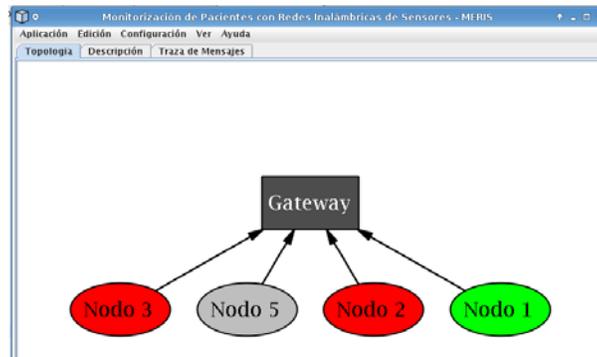


Fig. 72 Representación gráfica de la transición del apagado del nodo 5

Resultados: en las figuras 73, 74 y 75 se presentan el porcentaje del periodo de activación (% inicio Tx, % Fin Tx) designado a cada nodo, cuando a la WSN estaban conectados 7, 5 y 3 nodos respectivamente; los valores consignados para la figura 73 se puede observar que cada nodo cuenta con un 14 % para enviar su información a la Gateway, el 2% restante es el que se deja para que nuevos nodos puedan enviar sus solicitudes de adicción a la red, para el caso de 5 nodos en la WSN cada uno cuenta con el 19 % y para 3 nodos con el 32%.

Monitorización de Pacientes con Redes Inalámbricas de Sensores - MERIS								
Aplicación Edición Configuración Ver Ayuda								
Topología Descripción Traza de Mensajes								
Dirección	Salto	Lqi	Rssi	Evector	Offset	% InicioTx	% FinTx	
3	1	255	13	0	7852003	84	98	
5	1	255	13	2	7854003	0	14	
7	1	255	14	0	7856003	14	28	
2	1	255	14	2	7862003	56	70	
4	1	255	15	1	7850003	70	84	
1	1	255	14	0	7858003	28	42	
6	1	255	14	0	7860003	42	56	

Fig. 73 Slots de tiempo asignados para 7 nodos

Monitorización de Pacientes con Redes Inalámbricas de Sensores - MERIS								
Aplicación Edición Configuración Ver Ayuda								
Topología Descripción Traza de Mensajes								
Dirección	Salto	Lqi	Rssi	Evector	Offset	% InicioTx	% FinTx	
3	1	255	14	2	8206003	76	95	
5	1	255	14	0	8208003	0	19	
2	1	255	13	1	8202003	38	57	
4	1	255	14	2	8204003	57	76	
1	1	255	14	0	8210003	19	38	

Fig. 74 Slots de tiempo asignados para 5 nodos

Monitorización de Pacientes con Redes Inalámbricas de Sensores - MERIS							
Aplicación Edición Configuración Ver Ayuda							
Topología		Descripción		Traza de Mensajes			
Dirección	Salto	Lqi	Rssi	Evictor	Offset	% InicioTx	% FinTx
3	1	255	13	2	8300003	64	96
2	1	255	12	1	8298003	32	64
1	1	255	13	2	8302003	0	32

Fig. 75 Slots de tiempo asignados para 3 nodos

Conclusión: la *Gateway* sincroniza los nodos de primer rango de acuerdo a la cantidad de información que envía cada uno y el número de nodos que conforman la WSN, dado que para esta prueba todos los nodos generaban datos cada 2 segundos, los ST son iguales.

5.2.2.2 Prueba 2: enrutamiento de información de los nodos de segundo rango

Objetivo: verificar que las políticas definidas para el enrutamiento se aplican en el prototipo desarrollado.

Procedimiento: se ubicaron tres nodos en el primer rango de cobertura como se muestra en la figura 76, donde el nodo 3 se ubico en la posición (0,20) mts, el nodo 6 (10,20) mts y el nodo 4 en (-10,20) mts, estas medidas son respecto a la *Gateway*; luego se empezó alejar el nodo 3 primero hacia la derecha del plano y después hacia la izquierda, mientras se realizaban estos movimientos se observo en la interfaz de la estación base cual de los nodos 4 o 6 eligió como padre dependiendo de su posición.

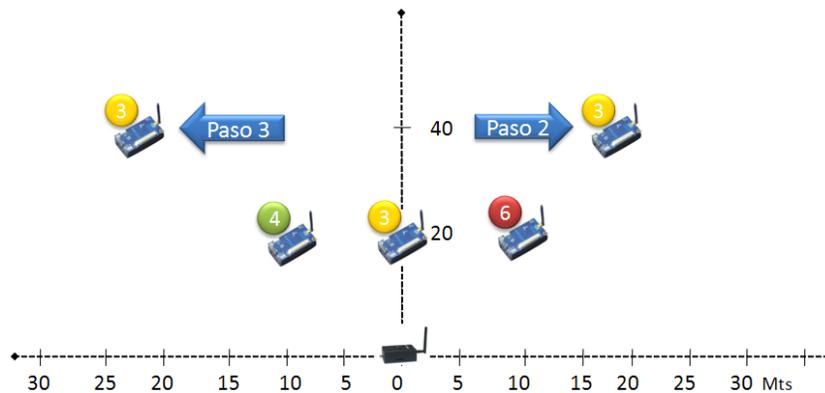


Fig. 76 Pasos efectuados en la prueba 2

Resultados: en la figura 77, 78 y 79 se presenta la topología de la red en los casos donde el nodo 3 estaba estático, hacia la derecha (30,40) mts y la izquierda (40,40) mts respectivamente, por supuesto cuando el nodo regresaba al centro para ir a la izquierda, este quedo de nuevo enviando mensajes a la *Gateway* directamente. En las figuras se observa que el nodo 3 cambia de clasificación esto se debe a que este tenía aleatorio la generación de los signos vitales, por el contrario de los nodos 4 y 6 que lo tenían fijo.

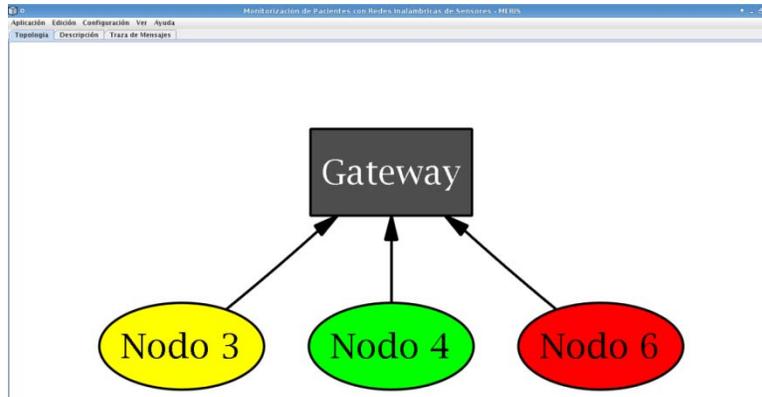


Fig. 77 Ubicación inicial de los nodos

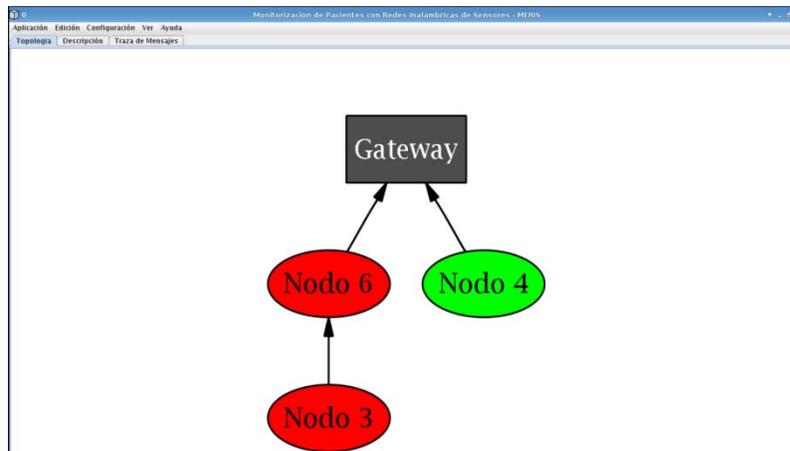


Fig. 78 Ubicación del nodo 3 cuando se desplazo a la derecha

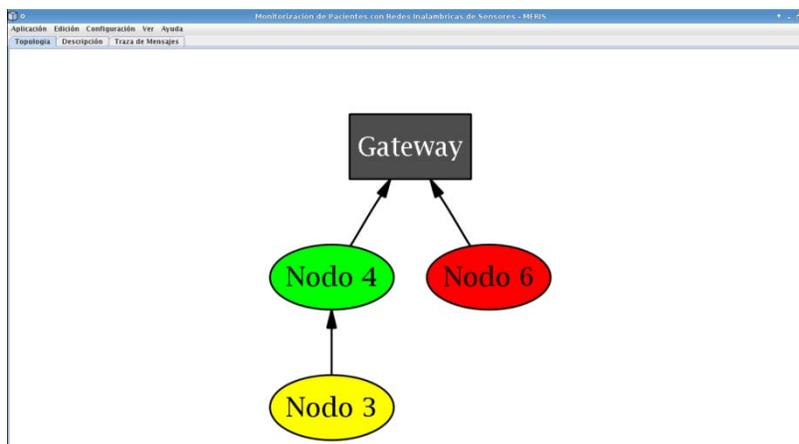


Fig. 79 Ubicación del nodo 3 cuando se desplazo a la izquierda

Observaciones: durante el desarrollo de la prueba se observo que el nodo varía constantemente de la elección del padre, esto se debe a que uno de los criterios para elegirlo es el RSSI el cual varía considerablemente dependiendo de factores externos como el paso de un carro entre el nodo y la Gateway.

De igual manera, el uso del RSSI puede originar que un nodo dentro del primer rango de cobertura decida elegir realizar un salto que envíe su información directamente a la *Gateway*.

Finalmente, es pertinente mencionar que cuando se empezó a desarrollar la implementación del algoritmo de enrutamiento se encontraron inconvenientes para la elección del padre a través del RSSI que se media en el nodo, debido a que este capturaba a una misma distancia valores de RSSI mayores que los que la *Gateway* recibía de él, es decir el nodo tiene mejor recepción que transmisión, lo cual se presenta debido a la diferencia entre las antenas del nodo y la *Gateway*, por lo tanto, se optó por enviar en las cabeceras de configuración que se envían con el *beacon* el RSSI que la *Gateway* percibe del nodo, de tal forma que el nodo trabaja con el valor medio entre el RSSI recibido y el percibido por la *Gateway*.

Conclusión: el algoritmo de enrutamiento empleado es adecuado dado que le indica a un nodo cuando buscar un padre aún si este se encuentra en primer rango de cobertura, por ejemplo es útil frente a un obstáculo.

5.2.2.3 Prueba 3: Priorización de mensajes.

Objetivo: verificar que las políticas definidas para la priorización de mensajes se aplican en el prototipo desarrollado.

Procedimiento: se ubicaron inicialmente 7 nodos dentro del primer rango de cobertura, como se presenta en la figura 80, luego se alejaron los nodos 6 y 5 al segundo rango de cobertura, los cuales eligieron al nodo 4 como padre figura 81. Para lograr la acumulación de paquetes en el nodo 4 se incluyó un periodo de inactividad a la supertrama de 3 segundos, de tal forma que esta quedó de 5 segundos y el periodo de actividad se mantuvo en 2 segundos, además se modificó la interfaz de monitoreo para que solo presentara los paquetes recibidos por el nodo 4, con el fin de poder visualizar más fácilmente el orden de llegada de los mensajes y los tiempos que estos permanecieron en la red desde su generación.

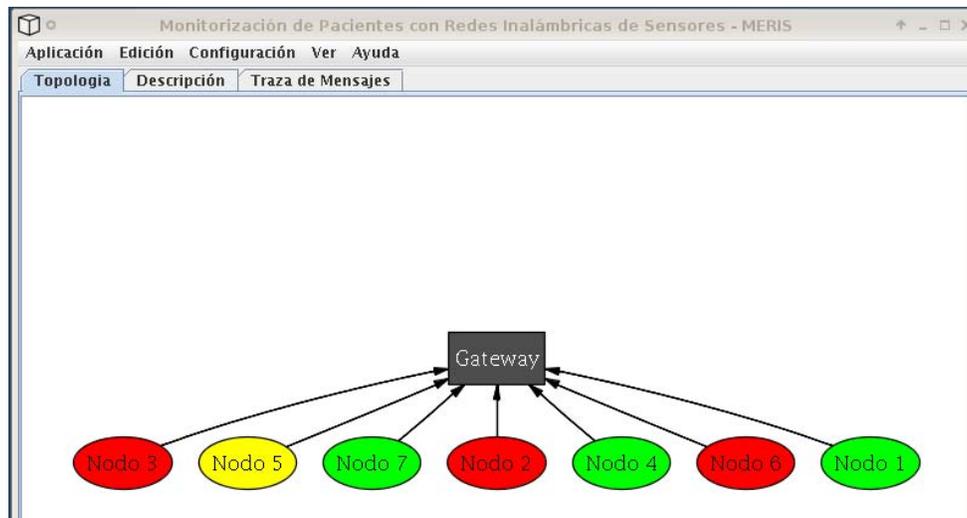


Fig. 80 WSN con 7 nodos

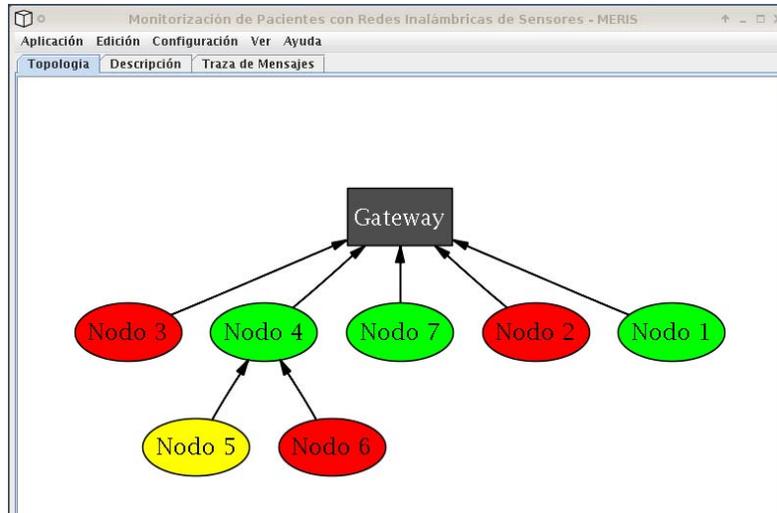


Fig. 81 WSN con 5 nodos en el primer rango y 2 en el segundo

En la figura 82 se muestra que los nodos 5 y 6 no tiene asignado un porcentaje de tiempo de transmisión a la *Gateway*, ya que sus mensajes son enviados a través del nodo 4, por lo cual, este si tiene asignado un porcentaje igual al triple que el asignado a cualquiera de sus vecinos de primer rango.

Monitorización de Pacientes con Redes Inalámbricas de Sensores - MERIS									
Aplicación Edición Configuración Ver Ayuda									
Topología Descripción Traza de Mensajes									
Dirección	Salto	Lqi	Rssi	Evector	Offset	% InicioTx	% FinTx		
3	1	255	19	1	258003	14	28		
5	1	255	17	1	252003	0	0		
7	1	255	20	0	256003	0	14		
2	1	255	18	2	262003	42	56		
4	1	244	19	0	264003	56	98		
1	1	255	19	0	260003	28	42		
6	1	255	17	2	254003	0	0		

Fig. 82 ST asignados a cada nodo

Resultados: en la figura 83, se encuentran resaltados los mensajes enviados por el nodo 4 a la *Gateway*, de los cuales se puede observar: primero que el nodo envió en primer lugar los mensajes etiquetados como rojo, luego los amarillos y segundo que entre dos mensajes de la misma prioridad envió primero el paquete con mayor tiempo en la red, el cual es el comportamiento esperado.

id	Plazo	Paciente	Triage	Respiración	Cardica	Saturación
4	4011msg	Paciente 4	40	40	109	13
4	3516msg	Paciente 4	41	41	100	14
4	3019msg	Paciente 4	42	42	40	15
4	2522msg	Paciente 4	43	43	50	16
4	1031msg	Paciente 4	46	46	104	17
4	537msg	Paciente 4	47	47	100	18
4	4545msg	Paciente 4	39	39	97	19
4	2055msg	Paciente 4	44	44	86	20
4	1562msg	Paciente 4	45	45	70	21
4	73msg	Paciente 4	48	48	61	22
4	2508msg	Paciente 4	53	53	50	23
4	2016msg	Paciente 4	54	54	48	24
4	1527msg	Paciente 4	55	55	113	25
6	1149msg	Paciente 6	39	39	117	26
6	1657msg	Paciente 6	38	38	50	27
6	2167msg	Paciente 6	37	37	100	28
6	2671msg	Paciente 6	36	36	50	29
4	1067msg	Paciente 4	56	56	50	30
6	3686msg	Paciente 6	34	34	46	31
6	3192msg	Paciente 6	35	35	100	32
6	200msg	Paciente 6	41	41	58	33
4	90msg	Paciente 4	58	58	100	34
4	4600msg	Paciente 4	49	49	73	35
6	5726msg	Paciente 6	30	30	85	36
6	4229msg	Paciente 6	33	33	70	37
4	4116msg	Paciente 4	50	50	74	38
4	3625msg	Paciente 4	51	51	71	39
6	743msg	Paciente 6	40	40	75	40

Fig. 83 Recepción de mensajes del nodo 4

Conclusión: la asignación de ST se realiza dependiendo del número de nodos hijos que tiene cada nodo de primer rango y la priorización de mensajes se realiza según la clasificación y el tiempo que el paquete lleva en la red.

5.2.2.4 Prueba 4: desempeño de la WSN con siete nodos en el primer rango de cobertura.

Objetivo: comparar el comportamiento de la WSN implementada con la WSN funcionando con los protocolos Diseminación y Colección de *TinyOS*, a través de los parámetros: latencia promedio y fiabilidad.

Procedimiento: para esta prueba se replicó el escenario 2 descrito en la prueba 5.2.1.2; en el cual se ubicaron siete nodos en el primer rango de cobertura (área de 10 X 4 mts) y se generaron mensajes cada 500 mseg. El periodo de actividad y la supertrama se fijaron a 2 segundos y se midió la latencia y la fiabilidad de la red.

Resultados: en la figura 84, se ilustra el comportamiento de la latencia para cada nodo, en la cual se puede observar que la latencia promedio es similar para todos los nodos y es menor a 5 ms, y los valores máximos de latencias no superaron los 27 mseg.

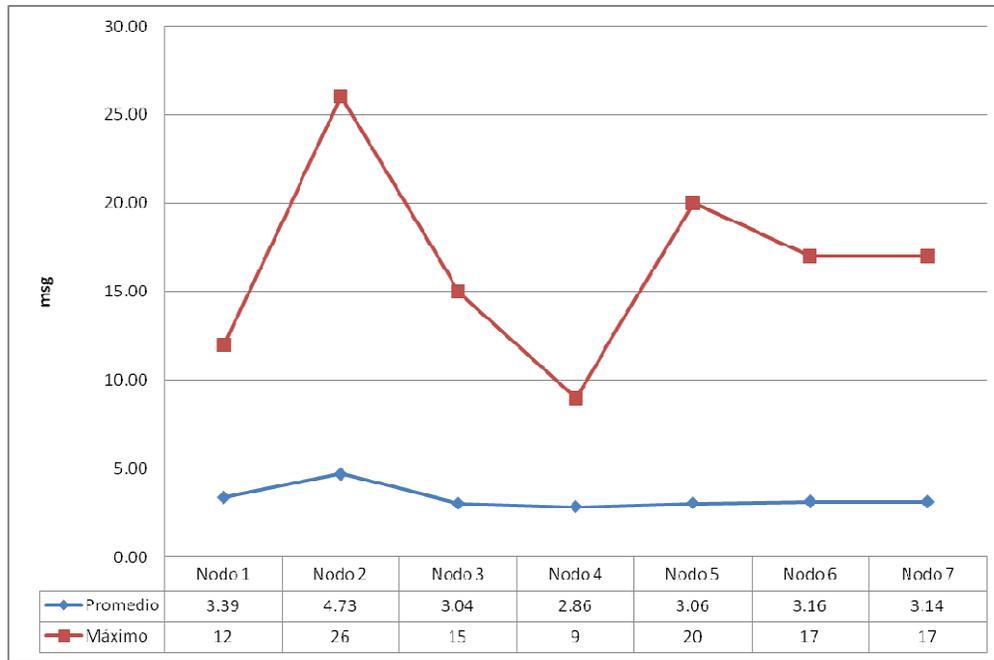


Fig. 84 Latencia promedio de la WSN según el número de nodos

En la figura 85, se presentan los valores de latencia promedio de la WSN funcionando con la arquitectura propuesta y con los protocolos de *TinyOS*, en la cual se puede verificar que los resultados obtenidos para esta propuesta son menores que los medidos para los protocolos *TinyOS*, lo cual se debe principalmente a que no se presentan colisiones entre los paquetes porque los nodos solo transmiten en los intervalos de tiempo asignados por la *Gateway*.

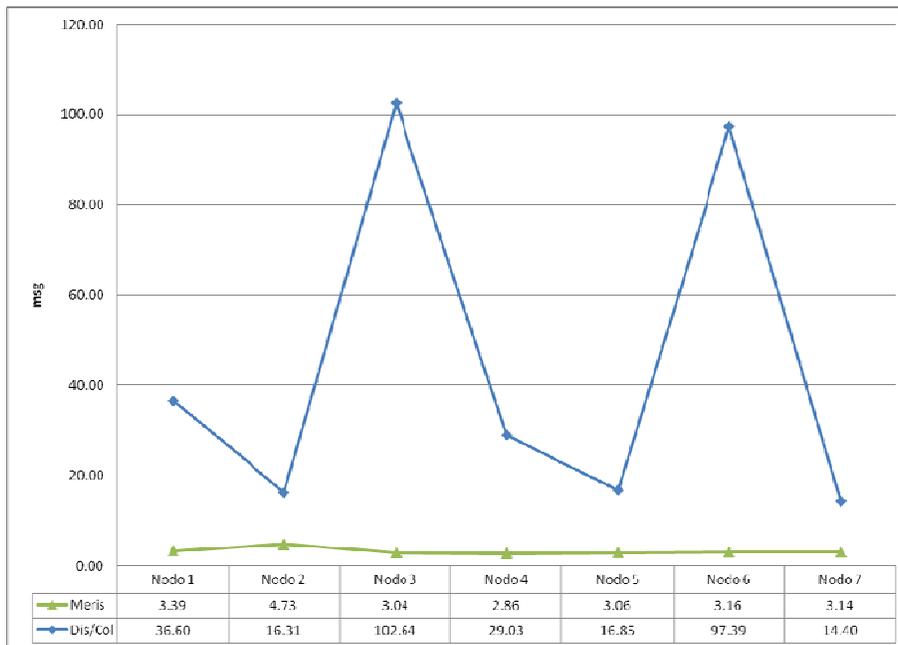


Fig. 85 Comparación de latencias entre MERIS y Protocolo Diseminador/Colector

La fiabilidad de la red no se ve afectada por el número de nodos, esta permanece entre los valores 99,2% y el 100% figura 86, debido a que los nodos se encuentran sincronizados con la *Gateway*. Al comparar los valores obtenidos con los consignados en la figura 63 para la WSN con protocolos *TinyOS*, se puede observar que la solución propuesta no genera la duplicidad en la recepción de paquetes que si se encuentra en esta.

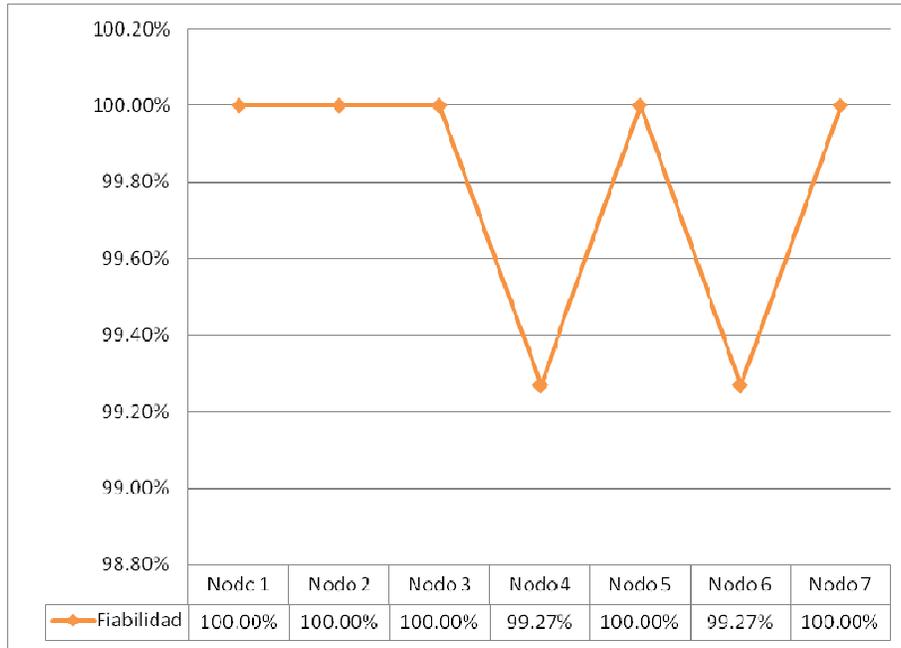


Fig. 86 Fiabilidad para cada uno de los nodos

Observaciones: el valor de la latencia promedio encontrado es de aproximadamente 5 mseg, el cual es característico al tiempo que le toma a un mensaje llegar a la *Gateway*, por lo cual la arquitectura propuesta permite tener valores de latencia que dependerán en mayor medida del tiempo que requiere el mensaje en recorrer la distancia que hay entre el nodo y la *Gateway*, además de esta permanecer constante con el incremento del número de nodos conectados a la red hasta el número de nodos que son soportados por esta en el primer rango. En la tabla 24, se presentan las diferencias encontradas entre las dos implementaciones

Tabla 24 Comparación entre WSN con protocolos *TinyOS* y la propuesta

Características	WSN <i>TinyOS</i>	MERIS
Latencia por un nodo	11ms	5 ms
Tamaño código	25 K byte	19 Kbyte
# de nodos <i>beacon</i> cada 2 seg	133	200
Sincronización	No	Si
Criterios de enrutamiento	LQI	RSSI, LQI, Evector, # saltos
Priorización de mensajes	No	Si
Cobertura	70 mts	60-70 mts

Conclusión: el prototipo desarrollado cumple con las características propuestas y disminuye el valor de la latencia promedio y aumenta el número de nodos que pueden ser manejados por una sola *Gateway* comparado con la WSN funcionando con los protocolos de *TinyOS*.

5.3 Resumen

Las pruebas realizadas tanto para la placa de sensado como para MERIS RT, se obtuvieron resultados satisfactorios. En la figura 87, se presenta el resumen de este capítulo en forma de mapa mental.

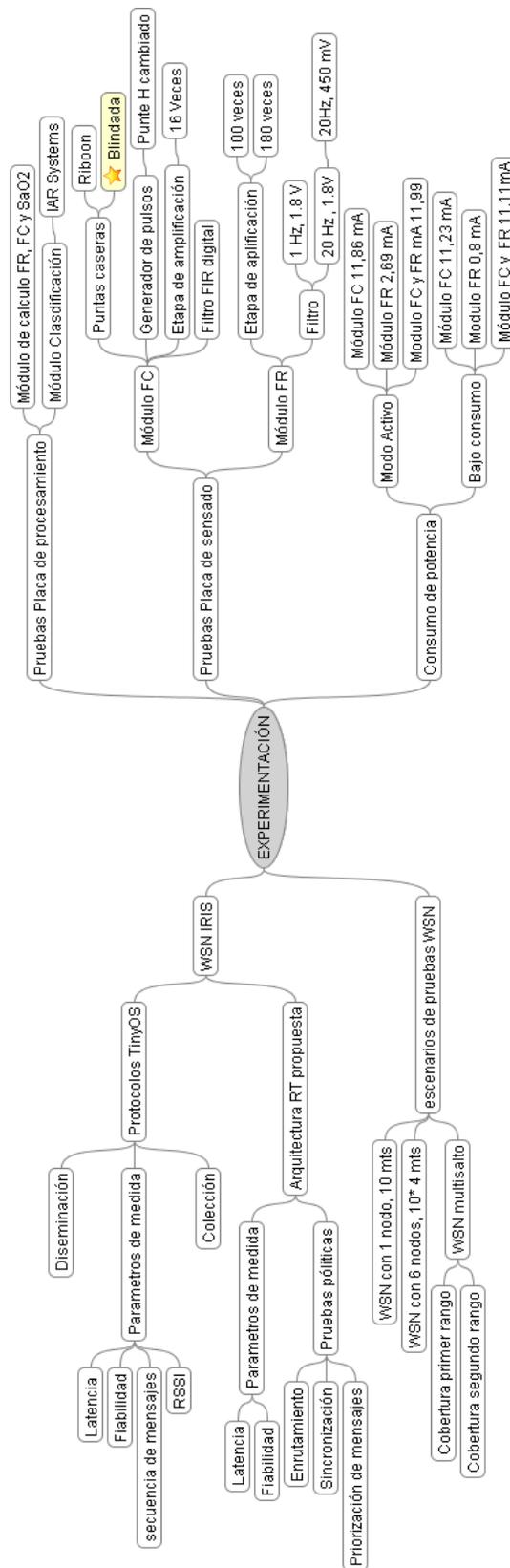


Fig. 87 Mapa conceptual, capítulo V

CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES

El desarrollo de este trabajo de maestría estuvo enfocado en dos partes, la primera en la adaptación del nodo CEI para el monitoreo de los signos vitales de un paciente dado que el prototipo con el que se contaba al iniciar el proyecto mide la temperatura y vibraciones de una estructura; y la segunda en la caracterización de la WSN para MERIS como un STR, lo cual está justificada porque errores tanto en el resultado de los cálculos de los signos vitales como en el tiempo de respuesta suponen un riesgo para las personas que están siendo monitoreadas por la red. Para lo cual, se adquirieron y aplicaron conocimientos en las áreas de: diseño de PCB, comunicaciones inalámbricas, WSN, sistemas empujados y sistemas de tiempo real.

El prototipo diseñado para nodo CEI cumple con las especificaciones requeridas para el proyecto MERIS, además los bloques de adaptación diseñados para los sensores son económicos aproximadamente 60 dólares comparados con dispositivos disponibles en el mercado, como el OEM III Module de la empresa Nonin, que es un módulo pulsoxímetro de 300 dólares [106], los cuales debido a su precio no son accesibles para las entidades de socorro del Departamento del Cauca y no considera la medición de la frecuencia respiratoria.

El módulo de frecuencia respiratoria fue diseñado y construido en función del comportamiento típico de un termistor, y dado que no se contó con el sensor comercial seleccionado, su verificación se realizó con el termistor CB34P2 de la empresa *Fenwal Electronics*; por lo anterior se considera que la respuesta de dicho módulo corresponde a lo esperado para el sistema propuesto.

La incompatibilidad de los módulos de radio entre CEI e IRIS no permitió el desarrollo de un prototipo conjunto. Los inconvenientes presentados en la práctica se deben a que los fabricantes toman decisiones de diseño distintas para optimizar sus rangos de trabajo, haciendo que entre unidades del mismo fabricante exista una compatibilidad mientras que con los productos de terceros, no necesariamente.

El prototipo desarrollado para la WSN de nodos IRIS cumplió con las características propuestas para el escenario objetivo del proyecto MERIS, sin embargo su puesta en marcha tuvo varios inconvenientes, el más significativo fue que no se contaba con herramientas de depuración, lo cual dificultó el filtrado de errores.

Los protocolos Diseminación y Colección de *TinyOS* sirvieron como referencia para medir el alcance de esta propuesta. Puesto que su adaptación para que garantizaran la entrega de los mensajes significaba un mayor esfuerzo que implementar una solución propia.

La sincronización de los nodos y la asignación de los Slots de Tiempo de acuerdo a la cantidad de información que generan los nodos, permitieron disminuir el valor promedio de la latencia de los mensajes generados por los nodos en comparación con la WSN funcionando con los protocolos Diseminación y Colección, lo cual se debe principalmente a que no se presentan colisiones entre los paquetes. Esta característica posibilita el manejo de un mayor número de nodos por parte de la *Gateway*.

La gestión de tráfico basada en la priorización de los mensajes de acuerdo a la clasificación del paciente y el tiempo de vida de la información, permite a los nodos de primer rango establecer los mensajes de información de los pacientes clasificados como

críticos como prioritarios; no obstante los otros mensajes etiquetados como amarillos o verdes tienen la posibilidad de incrementar su prioridad de envío al aumentar su tiempo de vida en la red.

La WSN implementada puede evadir obstáculos dado que el algoritmo de enrutamiento empleado le indica al nodo cuando buscar un padre aun si este se encuentra en primer rango.

Debido a que la confiabilidad de los datos sobre la red MERIS era un requisito obligatorio fue necesario reducir el alcance de la WSN de 130 mts a 70 mts, no obstante si se requiere cubrir una mayor cobertura se puede acondicionar la red uniendo varias *Gateways*. Por otra parte, el número de nodos que puede manejar una *Gateway* está limitado por el periodo de activación y la memoria del dispositivo dado que esta limita el uso de grandes tablas de enrutamiento.

La aplicación de la red MERIS está concebida inicialmente para realizar el *triage* prehospitalario de un gran número de pacientes víctimas de catástrofes, no obstante esta puede ser utilizada en un número reducido de personas.

La arquitectura propuesta para soportar comunicación en TR para MERIS, puede ser fácilmente utilizada para otras aplicaciones en WSN dado que las políticas definidas no dependen del tipo de información que se transmite sobre los paquetes de datos, y permiten tanto la configuración de los plazos como la de los tiempos de actividad e inactividad de la red. Además plantea mecanismos de alto nivel para la gestión de la información y sincronización de nodos.

Cada uno de los aportes recibidos por parte de los organismos de socorro en el desarrollo de cada una de las fases del proyecto fue fundamental para el desarrollo de este.

Como trabajo futuro se propone la validación de la arquitectura propuesta en otros escenarios y la inclusión de un sistema de localización confiable, de baja potencia y económico a la WSN, con el fin de ubicar oportunamente a un paciente dentro de un grupo.

REFERENCIAS

[1] Cuerpo de Bomberos Temuco, Rescate Vehicular (5ta Compañía), [En línea]. Disponible:<http://www.bomberostemuco.cl/index.php?option=content&task=view&id=57&catid=33&temid=60> [Consulta: 24/06/2009]

[2] H. Jaramillo, A. Abril, "MERIS - Monitorización de Emergencia de víctimas de catástrofes con Redes Inalámbricas de Sensores". VIII Convocatoria de ayudas y subvenciones de Cooperación y Solidaridad de la U.P.M. junio de 2007

[3] J. Potilla, A. Castro, E. de la Torre y T. Riesgo, "A Modular Architecture for Nodes in Wireless Sensor Networks" *journal of Universal Computer Science*, vol. 12, No 3, 2006. [En línea]. Disponible:
http://www.jucs.org/jucs_12_3/a_modular_architecture_for/jucs_12_03_0328_0339_portilla.html
[Consulta: 24/06/2009]

[4] M. Ilyas, I. Mahgoub, *Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems*. CRC Press, 2005, pp 22

[5] J. Serna, "Trabajo de Ampliación de Redes: Redes de Sensores Inalámbricas", enero 2007 [En línea]. Disponible: dajulian.googlepages.com/RedesdeSensores.pdf [Consulta: 24/06/2009]

[6] Crossbow, "Crossbow Technology Modules Portafolio Wireless" 2008. [En línea] Disponible: <http://www.xbow.com/Products/productdetails.aspx?sid=156> [Consulta: 24/06/2009]

[7] Moteiv, "tmote-sky-datasheet" 2007 [En línea] Disponible: <http://www.sentilla.com/pdf/eol/tmote-sky-datasheet.pdf> [Consulta: 24/06/2009]

[8] Shockfish, "TinyNode", 2004 [En línea] Disponible: <http://www.tinynode.com/> [Consulta: 24/06/2009].

[9] Intel, "Intel® Mote& Sensor Networks" [En línea] Disponible: http://www.ieee-or.org/chapters/cs/archives/intel_mote.pdf [Consulta: 24/06/2009].

[10] J. Tapia Zurita, Tesis profesional: Tutorial de redes de sensores ad hoc con eficiencia en energía 2006, Universidad de las Américas Puebla. [En línea] Disponible: http://caterina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/tapia_z_jl/index.html [Consulta: 24/06/2009].

[11] J. Ding, "Design and analysis of an integrated MAC and routing protocol framework for large-scale multi-hop wireless sensor networks," [En línea] Disponible: <http://net.pku.edu.cn/yidong/ROOT/DAWN-TR05-001.pdf>. [Consulta: 24/06/2009].

[12] IEEE Std 802.15.4 – 2003, IEEE Standar for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements (LR-WPAN, Low Rate – Wireless Personal Area Network)

[13] J. Lifton, D. Seetharam, M. Broxton, J. Paradiso, "Pushpin computing system overview: a platform for distributed, embedded, ubiquitous sensor networks," in Proc. 1st Internacional

Conference on Pervasive Computing (Pervasive '02), pp. 139–151, Zurich, Switzerland, August 2002

[14] A. Dunkels, B. Gronvall, T. Voigt. "Contiki - a lightweight and flexible operating system for tiny networked sensors". In LCN '04: Proceedings of the 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks (LCN'04), pages 455- 462, Washington, DC, USA, 2004. IEEE Computer Society.

[15] R. Barr, J. C. Bicket, D. S. Dantas, et al., "On the need for system-level support for ad hoc and sensor networks," *ACM SIGOPS Newsletter on Operating Systems Review*, vol. 36, no. 2, pp. 1–5, 2002

[16] *TinyOS* "TinyOS community Forum" [En línea] Disponible <http://www.TinyOS.net/special/mission> [Consulta: 24/06/2009].

[17] C. Han, R. Kumar, R. Shea, E. Kohler, M. Srivastava "A Dynamic Operating System for Sensor Nodes", Universidad de California. [En línea] Disponible <http://www.cs.ucla.edu/~kohler/pubs/han05dynamic.pdf> [Consulta: 24/06/2009].

[18] J. Hill, R. Szewczyk, A.Woo, S. Hollar, D. Culler, and K. Pister, "System architecture directions for networked sensors," in Proc. 9th ACM International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS '00), pp. 94–103, Cambridge, Mass, USA, November 2000.

[19] P. Buonadonna, J. Hill, D. Culler, "Active Message Communication for Tiny Networked Sensors", In Proceedings of the 20th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, Anchorage, Alaska, USA, April 2001.

[20] J. García Heredia, proyecto fin de carrera "Desarrollo y Estudio de Capacidades de Redes 802.15.4 Usando Dispositivos Micaz" septiembre de 2008. Universidad Politécnica de Cartagena.

[21] SysThecnologies. "SysThecnologies connecting data to decisions" 2006. [En línea] Disponible: <http://www.xsilogy.com/home/main/index.html> [Consulta: 24/06/2009].

[22] IQT in -Q- tel, "Portafolio By Practice Area" 2008 [En línea]. Disponible: <http://www.in-q-tel.com/technology-portfolio/index-es.html>. [Consulta: 18/02/2009]

[23] Ember, "Ember ZigBee Wireless Semiconductor Solutions" 2007 [En línea]. Disponible: <http://www.ember.com>. [Consulta: 18/02/2009].

[24] Center for the built environment, "Wireless Measurement and Control of the Indoor Environment in Buildings" [En línea]. Disponible: <http://www.cbe.berkeley.edu/research/briefs-wireless.htm>. [Consulta: 18/02/2009]

[25] DEXMA, "Redes Inalámbricas de sensores: sistemas de localización en tiempo real" [En línea]. Disponible: http://www.dexmatech.com/es/sobre_dexma/empresa. [Consulta: 18/02/2009]

[26] Omron, "Products and Services" [En línea]. Disponible: <http://www.omron.com/products/>. [Consulta: 18/02/2009]

-
- [27] Millennial Net, “*Wireless Sensor Mesh Networking*” [En línea]. Disponible: www.millennial.net. [Consulta: 18/02/2009]
- [28] Dust Networks, “Embedded Wireless Sensor Networking for Monitoring and Control” [En línea]. Disponible: www.dust-inc.com. [Consulta: 18/02/2009]
- [29] Texas Instruments [En línea]. Disponible: www.chipcon.com [Consulta: 18/02/2009]
- [30] Alliance *ZigBee*, [En línea]. Disponible: www.ZigBee.co [Consulta: 18/02/2009]
- [31] On World, “WSN for Healthcare” agosto 2008 [En línea]. Disponible: <http://www.onworld.com/healthcare/index.html> [Consulta: 24/06/2009]
- [32] S. Penagos, L. Salazar, F. Vera. “Guías para manejo de urgencias, Capítulo XV: Control de signos vitales. Fundación Cardioinfantil Bogotá 2003 [En línea]. Disponible: http://www.aibarra.org/Apuntes/criticos/Guias/Enfermeria/Control_de_signos_vitales.pdf [Consulta: 24/06/2009]
- [33] M. Morón, E. Casilari, J. Gázquez, “Sistema de Monitorización Inalámbrica de Sensores de SPO2 (pulsioxímetros)”. Diciembre 2004. [En línea]. Disponible: http://webpersonal.uma.es/de/ECASILARI/Research/Papers/Congresos/2005/Mundo_internetMJos e.pdf [Consulta: 02/03/2009]
- [34] Jafari R, Encarnacao A, Zahoory A, Dabiri F, Noshadi H, Sarrafzadeh M, “wireless sensor networks for health monitoring” *Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services*, 2005. *MobiQuitous 2005. The Second Annual International Conference on Volume , Issue , 17-21 July 2005 Page(s): 479 – 481.*
- [35] W. Walker, T. Polk, A. Hande, D. Bhatia, “Remote Blood Pressure Monitoring Using a Wireless Sensor Network” Marzo 2006. [En línea]. Disponible: https://utd.edu/~axh059000/publications/EITC_paper.pdf [Consulta: 21/04/2009]
- [36] Sensatex, “*SMARTSHIRT SYSTEM*”, 2007 [En línea]. Disponible: <http://www.sensatex.com/smartshirt.html> [Consulta: 18/02/2009].
- [37] P. Grossman, “The Lifeshirt: A multi-function ambulatory system monitoring health, disease, and medical intervention in the real world”, *Stud. Health Technology. Inform.*, vol. 108, 2004, pp. 133-14. [abstrac]. Disponible: <http://www.websciences.org/cftemplate/NAPS/archives/indiv.cfm?ID=20045023> [Consulta: 02/03/2009]
- [38] C Otto, A Milenkovic, C Sanders, E Jovanov, System Architecture of a Wireless Body Area Sensor Network for Ubiquitous Health Monitoring, *Journal of Mobile Multimedia*, 2006, 1(4): 307-326. [En línea]. Disponible: www.ece.uah.edu/~milenska/docs/coamej_jmm06.pdf [Consulta: 18/02/2009]
- [39] F. Dabiri, T. Massey. “*Light-weight Medical BodyNets.*” Second International Conference on Body Area Networks. Florence, Italy. June 2007. [abstrac]. Disponible: <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1460232.1460252&coll=guide&dl=GUIDE&CFID=12261703&CFTOKEN=91450953> [Consulta: 18/02/2009]
- [40] Nihon Kohden America. “*Patient Monitoring Technology for Rapid Response Temas*” [En línea]. Disponible: <http://www.savelivesavoidcosts.com> [Consulta: 18/02/2009]

-
- [41] M. Pinsky, M. DeVita. "Taking the next step in medical emergency team management. In ICU Management 2006 vol 4:12-15.
- [42] K. Lorincz, D. Malan, T. Fulford-Jones, A. Nawoj, A. Clavel, V. Shnayder, G. Mainland, M. Welsh, S. Moulton, "Sensor Networks for Emergency Medical Care" Technical Report TR-08-05, Division of Engineering and Applied Sciences, Harvard University, 2005. [En línea]. Disponible: <http://www.eecs.harvard.edu/~mdw/papers/CodeBlue-techrept05.pdf> [Consulta: 02/03/2009].
- [43] D. Malan, T. Fulford-Jones, M. Welsh, and S. Moulton, "CodeBlue: An Ad Hoc Sensor Network Infrastructure for Emergency Medical Care", International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks, Junio 2004. [En línea] Disponible en <http://www.eecs.harvard.edu/~mdw/papers/CodeBlue-bsn04.pdf> [Consulta: 02/03/2009]
- [44] J. Welch, F. Guilak, and S.D. Baker, "A wireless ECG smart sensor for broad applications in life threatening event detection." in Proc. 26th IEEE EMBS, San Francisco, CA, Sept. 2004, pp 3447-3449
- [45] K. Lorincz, D. Malan, T. Fulford-Jones, A. Nawoj, A. Clavel, V. Shnayder, G. Mainland, M. Welsh, S. Moulton, "Sensor Networks for Emergency Response: Challenges and Opportunities" 2004. [En línea] Disponible en <http://www.eecs.harvard.edu/~mdw/papers/CodeBlue-ieeeepvc04.pdf> [Consulta: 18/02/2009]
- [46] M. Welsh "CodeBlue: Wireless Sensor Networks for Medical Care Medical Care and Disaster Response". [En línea]. Disponible: <http://www.eecs.harvard.edu/~mdw/papers/ucsd-CodeBlue.pdf> [Consulta: 02/03/2009]
- [47] W. Tollefsen, M. Pepe, D. Myung, M. Gaynor, M. Welsh, S. Moulton. "iRevive, a Pre-hospital Mobile Database for Emergency Medical Services," International Journal of Healthcare Technology and Management (IJHTM), Summer 2004]
- [48] K. Lorincz, M. Welsh, "MoteTrack: A Robust, Decentralized Approach to RF-Based Location Tracking" Personal and Ubiquitous Computing, Special Issue on Location and Context-Awareness, Springer-Verlag, 2006. In press.
- [49] M. John, P. Bonato, M. Welsh. "A Wireless, Low-Power Motion Analysis Sensor for Stroke Patient Rehabilitation", Biomedical Engineering Society (BMES) 2005 Annual Fall Meeting, Baltimore, MD, September 28-October 1, 2005.
- [50] T. Gao, D. Greenspan, M. Welsh, R. Juang, A. Alm, "Vital Signs Monitoring and Patient Tracking Over a Wireless Network", In Proceedings of the 27th Annual International Conference of the IEEE EMBS, Shanghai, September 2005.
- [51] T. Gao, T. Massey, J. Sharp, W. Bishop, D. Bernstein, A. Alm "Integration of Triage and Biomedical Devices for Continuous, Real-Time, Automated Patient Monitoring,". IEEE Medical Devices and Biosensors Conference (IEEE MDBS 2006), Boston, september 2006.
- [52] J. Hill et al., "System Architecture Directions for Networked Sensors," in Proc. 9th Int'l Conf. Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS 2000), ACM Press, pp.93-104, 2000.
- [53] T. Gao, C. Pesto, L. Selavo, Y. Chen, J. Ko, J. Lim, A. Terzis, A. Watt, J. Jeng, B. Chen, K. Lorincz, M. Welsh, "Wireless Medical Sensor Networks in Emergency Response: Implementation and Pilot Results". In Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security, Waltham, MA, Mayo 2008.

-
- [54] Massey T, Gao T, Welsh M, Jonathan H, Sarrafzadeh M, "The Design of a Decentralized Electronic Triage System" AMIA 2006 Symposium Proceedings Page – 548.
- [55] T. Gao, T. Massey, L. Selavo, M. Welsh, M. Sarrafzadeh, "Participatory User Centered Design Techniques for a Large Scale Ad-Hoc Health Information System", Proceedings of HealthNet07 (in conjunction with MobiSys 07), Puerto Rico, June 11, 2007.
- [56] T. Gao, D White, "A Next Generation Electronic Triage to Aid Mass Casualty Emergency Medical Response," IEEE Engineering Medicine and Biology Society Conference (IEEE EMBS 2006), New York, NY, September 2006.
- [57] V. Ramos, O. Moreno, J. García, J.L. Monteagudo "seguridad y protección electromagnética en telemetría clínica basada en redes inalámbricas" La Informática de la Salud: Punto de Encuentro de las Disciplinas Sanitarias. INFORSALUD 2003 pp 229-235
- [58] ETS 300 328, ETSI, Radio Equipment and Systems (RES); Wideband transmission systems; Technical characteristics and test conditions for data transmission equipment operating in the 2,4 GHz ISM band and using spread spectrum modulation technique, Noviembre 1996
- [59] Patrulla Sky, Chile "Manual de primeros auxilios" 2007. [En línea]. Disponible: www.patrullas.cl/Manual_PA2007.doc [Consulta: 24/06/2009]
- [60] F. Lozano, "Consecuencias del retraso en las maniobras de reanimación" marzo 2009 [En línea]. Disponible: <http://www.fundaciondelcorazon.com/actualidad/otras-campanas/1142-cada-minuto-de-retraso-maniobras-de-reanimacion-cardiopulmonar-disminuye-posibilidades-supervivencia.html> [Consulta: 24/06/2009]
- [61] Wikipedia "Reanimación cardiopulmonar" marzo 2009 [En línea]. Disponible: http://es.wikipedia.org/wiki/Reanimaci%C3%B3n_cardiopulmonar [Consulta: 24/06/2009]
- [62] J. Puentes, L. Grajales "Interfaz de control con optimización de consumo de potencia para los sensores del proyecto MERIS" Septiembre, 2008 Universidad del Cauca.
- [63] B. Álvarez Álvarez, J. Gorostidi Pérez, O. Rodríguez Maroto, A. Antuña Egocheaga, P. Alonso Alonso. "Estudio del Triage y tiempos de espera en un Servicio de urgencias hospitalario Emergencias". Vol. 10, Núm. 2, Marzo-Abril 1998
- [64] G. Illescas, "Triage: atención y selección de pacientes" Agosto 2006, Revista TRAUMA Vol. 9, No. 2 pp 48-56.
- [65] I. Berdud, A. Martín, L. Jiménez, P. Aljama "En: Medicina de urgencias: Guía diagnóstica y protocolos de actuación", 2ª edición Córdoba. Hospital universitario Reina Sofía. 2000. 453-460
- [66] J. Pulido. Tesis Doctoral "Arquitectura de Software para Sistemas de Tiempo Real Particionados" 2007. Escuela técnica superior de ingenieros de telecomunicación, Universidad politécnica de Madrid.
- [67] F. Sevillano, M. Beltrán, "Arquitecturas Hardware y Software para sistemas de tiempo real", II Jornadas Técnicas de Telecontrol del Ciclo Integral de Agua, abril 2008.
- [68] A. Rendón, H. Jaramillo, curso: Sistemas de Tiempo Real, notas de clase 2007.

-
- [69] TimeSys Corporation, "The Concise Handbook Of Real-Time Systems", Version 1.3, 2002, pp 8 [E-Book]. Disponible: <http://www.ece.cmu.edu/~ece749/docs/RTSHandbook.pdf> [Consulta: 18/02/2009].
- [70].M. Caccamo, L. Zhang, L. Sha, and G. Buttazzo, "An Implicit Prioritized Access Protocol for Wireless Sensor Networks," Proc. IEEE Real-Time Systems Symp. (RTSS '02), pp. 39-48, 2002.
- [71] C. L. Liu and J. W. Layland, "Scheduling algorithm for multiprogramming in hard real time environment". Journal of the ACM, 20(1):40-61, 1973.
- [72]. C. Lu, B. M. Blum, T. F. Abdelzaher, J. A. Stankovic, and T. He, "RAP: a real-time communication architecture for large-scale wireless sensor networks," in Proc. of IEEE RTAS, San Jose, CA, USA, Sep 2002.
- [73] T. He, J. Stankovic, C. Lu, and T. Abdelzaher, "SPEED: a real-time routing protocol for sensor networks," in Proc. of IEEE ICDCS, Providence, RI, USA, May 2003, pp. 46- 55.
- [74] Karp, B.: "Geographic Routing for Wireless Network", PhD Dessertation, Harvard University, Cambridge, MA, Oct. 2000.
- [75] E. Felemban; Chang-Gun Lee, Ekici, E. MMSPEED: multipath Multi-SPEED protocol for QoS guarantee of reliability and. Timeliness in wireless sensor networks. Mobile Computing, IEEE Transactions on Volume 5, Issue 6, pages 738-754, June, 2006.
- [76] I.WG, "Draft Supplement to Standard for Telecommunications and Information Exchange between Systems—LAN/MAN Specific Requirements—Part 11:Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications: Medium Access Control (MAC)Enhancements for Quality of Service (QoS)," IEEE802.11e/D3.0, May 2002.
- [77] W. Jaballah, N. Tabbane. "Multi path Multi SPEED Contention Window Adapter". IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, VOL.9 No.2, February 2009.
- [78] IEEE802.11WG, "Draft supplement to IEEE standard802.11-1999: Medium access control (MAC) enhancements for quality of service (QoS)," 2003.
- [79].O. Chipara, Z. He, G. Xing, Q. Chen, X. Wang, C. Lu, J. Stankovic, T. Abdelzaher, "Real-time Power-Aware Routing in Sensor Networks,"2006.
- [80] E. Ngai, M. Lyu, J. Liu, "A Real-Time Communication Framework for Wireless Sensor-Actuator Networks", Aerospace Conference, 2006 IEEE, 2006.
- [81] T. Chan, C. Keung, H. Ngan, "Real-time Support for Wireless Sensor Networks" 2008 disponible <http://www.cs.ust.hk/~zgu/comp680g/projects/RTWSNReport.pdf>
- [82] Pagano, P., Chitnis, M., Romano, A., Lipari, G., Severino, R., Alves, M., Sousa, G., Tovar, E.: "ERIKA and OpenZB: an implementation for realtime wireless networking", Symposium on Applied Computing archive Proceedings of the 2009 ACM symposium on Applied Computing, Honolulu, Hawaii, ISBN:978-1-60558-166-8, pp. 1687-1688, 2009
- [83] Kumar, P., Güneş, M., Mamou, A., Schiller, J.: Real-time, Bandwidth, and Energy Efficient IEEE 802.15.4 for Medical Applications, 2008.
- [84] M. Henning and S. Vinoski, Advanced CORBA Programming with C++, Addison-Wesley Longman, Inc., 1999

[85] M. Ruiz. "Diseño y fabricación de placas para redes de sensores inalámbricas con nodos modulares". Universidad Politécnica de Madrid. Noviembre 2005

[86] F. Yanes. "Diseño e integración de elementos Hw-Sw para el desarrollo de plataforma modular de red de sensores inalámbrica con comunicación bluetooth". Universidad Politécnica de Madrid. Noviembre 2006.

[87] J. Burón. "Desarrollo de una biblioteca de interfaces electrónicas conforme al estándar IEEE 1451.2 ". Universidad Politécnica de Madrid. Abril 2006.

[88] Biolinkarg. Termistor - Sensor de Fluxo Respiratório Buconasal. [En línea]. Disponible: <http://www.biolinkarg.com/termistor/index.html> [Consulta: 07/12/2009]

[89] D. Rapoport, R. Norman, M. Nielson. "Nasal Pressure Airflow Measurement An Introduction. Pro-Tech". 2001 [En línea]. Disponible: <http://www.ptservices.com/Downloads/Misc/pdf/primer.pdf> [Consulta: 02/03/2009]

[90] Sleepmate. AC Pressure Airflow Sensor System User Guide. Sleepmate. [En línea]. Disponible: <http://www.sleepmate.com/images/ACPressure.pdf> [Consulta: 02/03/2009]

[91] A.BaHammam. Comparison of Nasal Prong Pressure and Thermistor Measurements for Detecting Respiratory Events during Sleep. Karger. marzo 2004 [En línea]. Disponible: <http://content.karger.com/ProdukteDB/produkte.asp?Aktion=ShowPDF&ArtikelNr=79644&Ausgabe=230308&Prod> [Consulta: 02/03/2009]

[92] Compumedics. Using Nasal Pressure to Diagnose Hypopnea. Compumedics. febrero 2006 [En línea]. Disponible: <http://www.compumedics.com/library/Using%20Nasal%20Pressure%20CMP.pps> [Consulta: 02/03/2009]

[93] A. Tobola, C. Douniama. Evaluation Of Alternative Derivation Areas For Plethysmography AndPulse Oximetry. Inprimo. 2007 [En línea]. Disponible: http://inprimo.org/information/BMT2007_Aachen_Alternative_Derivation_Areas_Plethysmography.pdf [Consulta: 02/03/2009]

[94] V. Chan, S. Underwood, "A Single-Chip Pulsoximeter Design Using the MSP430," Texas Instruments, Noviembre 2005. [En línea]. Disponible: <http://focus.ti.com/lit/an/slaa274/slaa274.pdf> . [Consulta: 02/03/2009]

[95] Kodenshi, "BL23G," Guangdianzi-sh. [En línea]. Disponible: [http://www.guangdianzi-sh.com/download/pdf/BL23G\(3\).PDF](http://www.guangdianzi-sh.com/download/pdf/BL23G(3).PDF) [Consulta: 02/03/2009]

[96] Kodenshi, "EL23G," Kodenshi. [En línea]. Disponible: http://www.kodenshi.co.jp/seihin/pdf/emittingdiodes_gaas/el23g.pdf [Consulta: 02/03/2009]

[97] Kodenshi, "HPI23G," Kodenshi. [En línea]. Disponible: http://www.kodenshi.co.jp/seihin/pdf/pinphotodiode/hpi23g_b.pdf [Consulta: 02/03/2009]

[98] Aur der Heyde E. Disaster Response: Principles of Preparation and Coordination. St Louis: CV Mosby 1989

[99] Texas Instruments, "MAX3221-EP Enhanced Product 3V to 5.5V Single Channel RS23 Line Driver/Receiver with plus/15Kv," Texas Instruments. [En línea]. Disponible: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/max3221-ep.pdf> . [Consulta: 02/03/2009]

[100] Advance software engineering, "ChartDirector," Advance software engieneering. [En línea]. Disponible: <http://www.advsofteng.com/cdcom.html> . [Consulta: 02/03/2009]

-
- [101] Crossbow Technology, "Crossbow Technology: IRIS 2.4 Ghz", [En línea]. Disponible: <http://www.xbow.com/Products/SelectCountry.aspx?sid=264> [Consulta: 18/02/2009]
- [102] Crossbow Technology, "Crossbow Technology: MIB520CB- USB Gateway", [En línea]. Disponible: <http://www.xbow.com/Products/productdetails.aspx?sid=227> [Consulta: 21/04/2009]
- [103] P. Levis, G. Tolle, "TEP 118: Dissemination of Small Values". [En línea] Disponible: <http://www.TinyOS.net/TinyOS-2.x/doc/html/tep118.html> [Consulta:01/10/2009]
- [104] P. Levis, N. Patel, D. Culler, S. Shenker. "Trickle: A Self-Regulating Algorithm for Code Maintenance and Propagation in Wireless Sensor Networks." In Proceedings of the First USENIX/ACM Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 2004).
- [105] R. Fonseca, O. Gnawali, K. Jamieson, and P. Levis, "TEP 119 Collection" [En línea]. Disponible: <http://www.TinyOS.net/TinyOS-2.x/doc/html/tep119.html> [Consulta:01/10/2009]
- [106] Nonin, "OEM III module," Nonin. [online]. Disponible: <http://www.nonin.com/products.asp?ID=26&sec=2&sub=9> . [Consulta 02/03/2009].