

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo de Fin de Máster

**Redes de Sensores Inalámbricas
Aplicado a la Medicina**
(Wireless Sensor Networks Applied to the
Medicine)

Para acceder al Título de

**Máster en Tecnologías de la Información y
Comunicaciones en Redes Móviles (TICRM)**

Autor: Esther Elena Flores Carbajal

Octubre – 2012

ACTA DE CALIFICACIÓN

Estudiante (nombre y apellidos):	Esther Elena Flores Carbajal
Director/es del Trabajo de Fin de Máster (nombre y apellidos):	Luis Sánchez González
Título:	Redes de Sensores Inalámbricas Aplicada a la Medicina
Title:	Wireless Sensor Networks applied to the Medicine
Presentado a examen el día:	30 de Octubre de 2012

COMPOSICIÓN DEL TRIBUNAL

Presidente (Apellidos, Nombre):	
Secretario (Apellidos, Nombre):	
Vocal (Apellidos, Nombre):	

Este tribunal ha resuelto otorgar la calificación de:

Fdo.: El Presidente	Fdo.: El Secretario
Fdo.: ☐ El Vocal ☐ El Coordinador del máster En el caso de que el vocal del tribunal asista por videoconferencia, firmará en su nombre el coordinador del máster.	Fdo.: El Director del TFM Vº Bº del Subdirector – Jefe de Estudios

INDICE GENERAL

1. Introducción y Objetivo.....	01
2. Introducción a las Redes de Sensores inalámbricos.....	02
2.1. Introducción.....	02
2.2. Descripción de la WSN	03
2.3. Arquitectura de una red de sensores inalámbricos.....	05
2.4. Características de WSN	06
2.5. Aplicación de las Redes de Sensores.....	07
2.5.1. Aplicaciones Militares	08
2.5.2. Aplicaciones en la Agricultura.....	09
2.5.3. Aplicaciones en Medio ambiente.....	10
2.5.4. Aplicaciones en la Automoción.....	11
2.5.5. Aplicaciones en la Domótica.....	12
2.5.6. Aplicaciones en el Monitoreo de Estructuras.....	13
2.5.7. Aplicaciones en la Medicina.....	15
3. Fundamentos Teóricos.....	15
3.1. Introducción.....	15
3.2. Factores de diseño en redes de sensores inalámbricos.....	15
3.2.1. Tolerancia a fallos.....	16
3.2.2. Escalabilidad.....	16
3.2.3. Costes de producción.....	17
3.2.4. Restricciones de hardware.....	17
3.2.5. Topología de la red de sensores.....	17
3.2.6. Entorno.....	18
3.2.7. Medio de transmisión.....	18
3.2.8. Consumo de energía.....	19
3.3. Arquitectura de un Nodo.....	19
3.3.1. Componentes de un nodo sensor Wireless.....	20
3.3.1.1. Fuente de energía.....	20
3.3.1.2. Microcontrolador.....	21
3.3.1.3. Unidad/es de detección o sensores.....	23
3.3.1.4. Radio.....	25
3.4. Comparativa de las motas o nodos inalámbricos.....	25
3.5. Estándar IEEE 802.15.4 y Zigbee.....	28

3.5.1. Estándar IEEE 802.15.4.....	28
3.5.2. Arquitectura del estándar IEEE 802.15.4.....	31
3.5.3. ZigBee.....	32
3.6. Protocolos de enrutamiento para WSN.....	33
3.6.1. Modelos de enrutamiento.....	34
3.6.1.1. Modelo de un salto.....	34
3.6.1.2. Modelo Multi-hop.....	34
3.6.1.3. Modelo esquemático basado en clústeres... ..	35
3.7. Sistema Operativo para Nodos Sensores.....	36
3.7.1. Sistema operativo TINYOS.....	36
3.7.2. Sistema operativo Contiki.....	37
3.7.3. Sistema operativo eCos.....	38
3.7.4. Sistema operativo MANTIS.....	38
3.8. Casas de dispositivos para WSN.....	38
3.8.1. Crossbow.....	38
3.8.2. Shockfish.....	39
3.8.3. Sentilla.....	39
3.8.4. BTnode.....	40
3.8.5. Sun.....	40
3.8.6. Ember.....	41
4. Aplicación de WSN en el ámbito de la medicina.....	41
4.1. Introducción.....	41
4.2. Visión general de la aplicación de WSN en la medicina.....	42
4.3. Descripción detallada de la aplicación de WSN en el ámbito médico.....	45
4.3.1. Red inalámbrica para vigilancia de la salud:	
Frecuencia Cardíaca y Sensor de temperatura.....	45
4.3.1.1. Introducción.....	45
4.3.1.2. Descripción del sistema.....	47
4.3.1.3. Conclusión.....	64
4.3.2. Aplicación de WSN para la monitorización de pacientes con	
enfermedad de Parkinson.....	65
4.3.2.1. Introducción.....	65
4.3.2.2. Enfermedad de Parkinson.....	66
4.3.2.3. Requisitos del sistema.....	68
4.3.2.4. Diseño del sistema e implementación.....	69

4.3.2.5. Experimentos y resultados.....	73
4.3.2.6. Conclusiones.....	75
5. Proyectos orientados al desarrollo de WSN aplicados a la Medicina.....	75
5.1. Introducción.....	75
5.2. Relación de proyectos orientados al desarrollo de WSN aplicado a la medicina.....	75
6. Conclusión y líneas futuras.....	78
7. Bibliografía.....	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Arquitectura de una red de sensores inalámbricos	05
Figura 2.	Aplicaciones de las WSN.....	07
Figura 3.	Nodos implantados para la monitorización de los viñedos.....	10
Figura 4.	Posición de los sensores desplegados en el hábitat del petrel.....	11
Figura 5.	Proyecto Trackss, para mejorar la seguridad y eficiencia del transporte.....	12
Figura 6.	Sistema de iluminación inteligente en oficinas.....	13
Figura 7.	Puente monitoreado con sensores.....	14
Figura 8.	Colocación de los sensores en el puente.....	15
Figura 9.	Arquitectura de un nodo	20
Figura 10.	Diferentes tipos de sensores.....	24
Figura 11.	Tamaño de los sensores.....	25
Figura 12.	Familia de Motas Mica y Telos.....	25
Figura 13.	Mota.....	26
Figura 14.	Arquitectura de IEEE 802.15.4.....	31
Figura 15.	Red de motas.....	35
Figura 16.	Logotipo de Crossbow.....	39
Figura 17.	Logotipo de Schockfish.....	39
Figura 18.	Logotipo de Sentilla.....	40
Figura 19.	Logotipo de BTnodes.....	40
Figura 20.	Logotipo de Sun microsystems.....	41
Figura 21.	Implementación física para la monitorización niveles. de glucosa.....	43
Figura 22.	Localización del sensor en el ojo.....	44
Figura 23.	Sensor para la detección precoz del cáncer.....	45
Figura 24.	Vista Conceptual del sistema.....	48
Figura 25.	Arduino, XBee shield and modulo XBee.....	48
Figura 26.	Comparaciones de lecturas de temperatura después de la calibración.....	51
Figure 27.	Lecturas del termómetro de temperatura TMP36 vs Omron.....	53
Figura 28.	Datos de TMP36 y datos modificados vs termómetro Omron.....	54
Figura 29.	Longitud de onda de infrarrojos y la luz roja.....	56
Figura 30.	Diagrama simplificado del hardware.....	57
Figura 31.	Sensor IR / fototransistor y filtro de paso alto (high-pass).....	57
Figura 32.	Amplificación de la señal.....	58
Figura 33.	Filtro de paso bajo (Low pass).....	58

Figura 34.	Histéresis y referencia de tensión del umbral.....	59
Figura 35.	Diagrama completo del esquema del hardware.....	61
Figura 36.	Salida analógica del amplificador operacional.....	62
Figure 37.	Prueba de la salida digital del comparador.....	62
Figura 38.	Detección de los latidos.....	62
Figura 39.	Frecuencia de pulsos ($1.064 * 60 \sim 64$ latidos por minuto).....	62
Figura 40.	Ciclo de fluctuación motora de la enfermedad del Parkinson.....	67
Figura 41.	Escenario general de monitorización domiciliaria.....	69
Figura 42.	Visión general de la arquitectura del sistema de monitorización propuesto.....	71
Figura 43.	Captura de pantalla de la aplicación web MercuryLive.....	72
Figura. 44.	Los mejores (negro) y el peor (rojo) caso de error de clasificación (%) para diferentes combinaciones de características.....	74

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Comparativa de nodos inalámbricos.....	27
Tabla 2.	Comparativa estándares Wireless.....	30
Tabla 3.	Bandas de frecuencia utilizadas por el estándar IEEE 802.15.4.....	30
Tabla 4.	t-test – paired two sample for means.....	55

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Las redes de sensores son un campo de estudio actualmente en auge, que evoluciona rápidamente debido al gran interés suscitado. Son un concepto relativamente nuevo dentro de la adquisición y tratamiento de datos, relacionado con el paradigma de los agentes inteligentes en busca del “entorno inteligente”, con muy diversas aplicaciones como la automatización de las instalaciones industriales, comerciales, agrícolas, residenciales, transporte, etc. Si observamos la tendencia seguida por las tecnologías de la información y de las comunicaciones, podremos constatar una constante evolución hacia dispositivos embebidos, cada vez más pequeños y de menor consumo, dotados con mayor potencia de proceso, capacidad de almacenamiento y facilidad para las comunicaciones.

De forma simultánea, la tecnología de sensores ha evolucionado siguiendo esta misma tendencia, asimilando características de los sistemas embebidos hasta el punto de proporcionar dispositivos que difícilmente pueden diferenciarse de los nodos computacionales, incorporando capacidades cognitivas y de comunicación con las que llegan a establecer verdaderas redes semánticas de información.

Además, en base a estos avances tecnológicos, las características de las redes han ido variando, pasando de estar compuestas por un número limitado de nodos conectados de forma cableada a un equipo central, a ser mecanismos distribuidos, más pequeños, baratos, de menor consumo, capaces de procesar información localmente y transferirla de forma inalámbrica.

Por otra parte, la investigación relacionada con el entorno médico cada vez va en aumento ya que las aplicaciones médicas de las redes de sensores inalámbricos son una de las áreas más prometedoras para su uso práctico. Actualmente se están empleando muchos esfuerzos que se focalizan en el desarrollo fiable, flexible y barato de dichas redes que puedan utilizarse en aplicaciones médicas.

El objetivo principal de este trabajo es llevar a cabo un estudio sobre las redes de sensores inalámbricas aplicados al área de la medicina. Para lo cual se tratará aspectos relevantes que ayuden a comprender el funcionamiento de esta tecnología para luego enfocar el tema en el entorno médico, y de esta forma conocer como se esta aprovechando el potencial de las WSN para mejorar la calidad, y eficiencia en los cuidados de la salud.

La estructura del presente trabajo es como sigue:

Capítulo II, se realiza una introducción general a las redes de sensores inalámbricos, además de la descripción, características, arquitectura y aplicación de esta tecnología.

Capítulo III, se tratará sobre la arquitectura de un nodo, el estándar 802.15.4, los principales sistemas operativos, principales fabricantes de dispositivos para WSN y los distintos factores que afectan la WSN.

Capítulo IV, se presentará una visión general de las diversas aplicaciones de las WSN en el ámbito de la medicina, también se describirá detalladamente algunas aplicaciones desarrolladas en los últimos tiempos.

Capítulo V, En esta sección trata sobre los diferentes proyectos orientados al desarrollo de WSN en el ámbito medico.

Por último, el capítulo se encuentra las conclusiones y líneas futuras.

2. INTRODUCCIÓN A LAS REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS

2.1.Introducción

En las últimas décadas ha existido un explosivo crecimiento de las redes de computadores y, en concreto, de las comunicaciones inalámbricas, propiciado por los continuos avances tecnológicos. Así, se han podido desarrollar dispositivos sensores electrónicos de menor tamaño, bajo coste y consumo reducido, capaces de procesar información de manera local y comunicarse de forma inalámbrica.

Todos estos factores han permitido el despegue del campo de investigación de las Redes Inalámbricas de Sensores (RIS), conocidas en inglés como Wireless Sensor Networks (WSN), que han sido identificadas

como una de las tecnologías más prometedoras por diversos analistas tecnológicos y revistas especializadas, entre las que se puede destacar el observatorio tecnológico del Instituto Tecnológico de Massachusetts [1].

En la actualidad pueden encontrarse diferentes tipos de sensores en un gran número de sistemas y dispositivos electrónicos.

En la mayor parte de las aplicaciones, estos sensores actúan únicamente como transductores, realizando la medida de una o más variables del entorno y enviando esta información a un nodo central que se encarga de su procesamiento.

Sin embargo, se ha avanzado tremendamente en una nueva generación de sensores dotados de inteligencia propia, capaces de organizarse e interconectarse de forma autónoma con otros sensores de semejantes características. Surgen de este modo las llamadas redes de sensores inalámbricos WSN, suponiendo una revolución tecnológica equiparable en algunos ámbitos a la que supuso la aparición de Internet.

En este capítulo se realizará una introducción general a las redes de sensores inalámbricos, así como a sus conceptos asociados y fundamentos teóricos. De esta manera, se tendrá una visión general de las tecnologías asociadas a las redes de sensores.

2.2.Descripción de la WSN

Los dispositivos de una WSN, conocidos como nodos sensores o motas (en inglés mote) son unidades autónomas, capaces de realizar algún tipo de procesamiento, recopilación de la información sensorial, y la comunicación con otros nodos conectados en la red. Tienen la habilidad de medir un medio físico con gran detalle. Asimismo, constan de un microprocesador, fuente de energía (casi siempre una batería), un radiotransceptor y un elemento sensor.

Una WSN es una red de diminutos dispositivos, equipados con sensores, que colaboran en una tarea común y están distribuidos en un área geográfica determinada.

Las redes de sensores están formadas por numerosos sensores con ciertas capacidades sensitivas y de comunicaciones inalámbricas para controlar y medir determinadas condiciones físico-ambientales en distintos entornos, tales como la temperatura, la humedad, la presión, el sonido, etc.

Las WSN tienen capacidad de autorestauración, es decir, si se avería un nodo, la red encontrará nuevas vías para encaminar los paquetes de datos. De esta forma, la red sobrevivirá en su conjunto, aunque haya nodos individuales que pierdan potencia o se destruyan. Las capacidades de autodiagnóstico, autoconfiguración, auto-organización, autorestauración y reparación, son propiedades que se han desarrollado para este tipo de redes para solventar problemas que no eran posibles con otras tecnologías. Las redes de sensores se caracterizan por ser redes desatendidas (sin intervención humana), habitualmente construidas ad-hoc para resolver un problema muy concreto (es decir, para ejecutar una única aplicación).

Este tipo de redes, son autónomas, capaces de comunicarse entre sí, recoger y distribuir datos. A través de estas redes inteligentes, se pueden integrar funcionalidades que antes eran independientes unas de otras, con el fin de lograr una máxima eficiencia.

Las redes de sensores inalámbricas permiten formar redes ad-hoc [2] sin infraestructura física preestablecida ni administración central. La expresión ad-hoc hace referencia a una red en la que no hay un nodo central, sino que todos los dispositivos están en igualdad de condiciones. Ad-hoc es el modo más sencillo para crear una red, un tipo de red formada por un grupo de nodos móviles que forman una red temporal sin la ayuda de ninguna infraestructura externa. Para que esto se pueda llevar a la práctica es necesario que los nodos se puedan ayudar mutuamente para conseguir un objetivo común: que cualquier paquete llegue a su destino aunque el destinatario no sea accesible directamente desde el origen. El protocolo de encaminamiento es el responsable de descubrir las rutas entre los nodos para hacer posible la comunicación. [3][4][5][6].

2.3. Arquitectura de una red de sensores inalámbricos

Como ya hemos comentado anteriormente, las WSN se componen de dispositivos pequeños, autónomos, distribuidos geográficamente, llamados nodos sensores. Estos gozan de capacidad de cómputo, almacenamiento y comunicación en una red conectada sin cables, e instalados alrededor de un fenómeno objeto para monitorizarlo.

Una vez que se produzcan eventos, toma de medidas o cualquier actividad programada con el fenómeno en cuestión, la información es transformada en digital en el propio nodo, y transmitida fuera de la red, vía un elemento Gateway, a una estación base, donde la información pueda ser almacenada y tratada temporalmente para acabar finalmente en un servidor con mayor capacidad que permita componer una secuencia histórica o realizar una análisis de los datos.

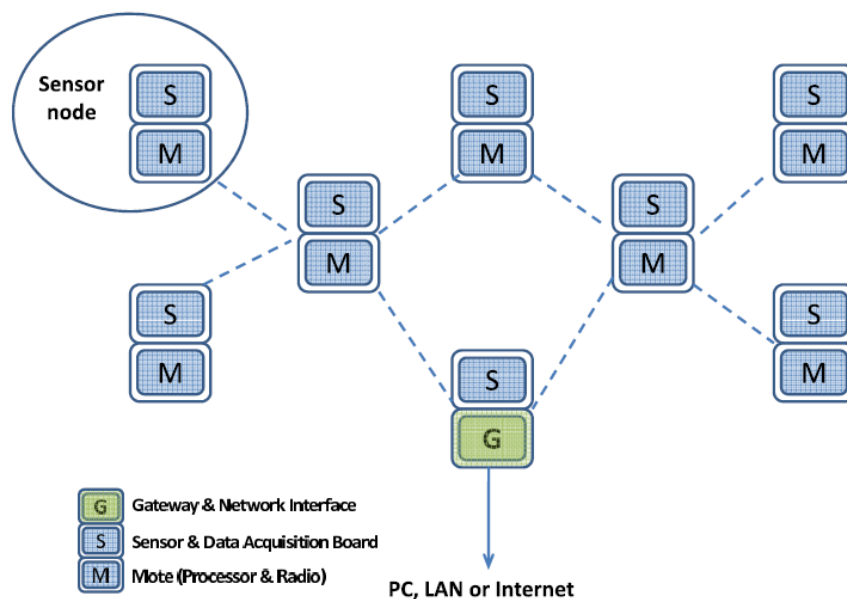


Figura 1. Arquitectura de una red de sensores inalámbricos

Por lo tanto en una WSN nos podemos encontrar con los siguientes elementos:

- **Nodos Sensor:** Se compone de una mota y una placa de sensores. Mota es la entidad compuesta de un procesador y los dispositivos de radio. La placa del sensor es una tarjeta de adquisición de datos conectado a la mota a través de un conector de expansión, que incluye un conjunto de sensores. Algunos modelos de nodo de sensores incorporan los sensores en la propia mota (por ejemplo, las motas de la familia Telos). Algunos ejemplos de sensores son: el de temperatura, humedad, el acelerómetro, magnetómetro, o sonido.
- **Gateway o Pasarela (Puerta de enlace):** Son los elementos destinados a la interconexión entre la red de sensores y una red de datos (por ejemplo TCP/IP)
- **Estación base:** Actúa como recolector de datos basado en un ordenador común o un sistema integrado.

2.4. Características de WSN

Las principales características de este tipo de redes son las siguientes:

- Despliegue Ad-hoc y a gran escala sobre una superficie.
- No se utiliza infraestructura de red. Una red de sensores no tiene necesidad alguna de infraestructura para poder operar, ya que sus nodos pueden actuar de emisores, receptores o *router*.
- Estos dispositivos están destinados a ser extremadamente pequeños, variando en tamaño desde una escala del micrómetro a un milímetro (que puede ser comparado con un grano de arena o incluso una partícula de polvo).
- Nodos con reducido consumo de energía y memoria. Estas redes funcionan con pilas y tienen una larga autonomía de funcionamiento. Pueden operar sin mantenimiento durante varios meses o años.
- Se utilizan tecnologías inalámbricas de corto alcance, el encaminamiento entre dos nodos sin visión directa se realiza mediante comunicaciones multisalto.

- Topología dinámica: nodos auto-configurables, tolerancia a fallos y presentan una elevada fiabilidad.
- Utilización de envío de mensajes en broadcast.
- Coste muy bajo.
- Integración con otras tecnologías como agricultura, biología, medicina, etc.

2.5. Aplicación de las Redes de Sensores

El rango potencial de aplicaciones está únicamente limitado por la imaginación ya que la convergencia de las tecnologías de información y comunicaciones inalámbricas, con técnicas de miniaturización, han convertido a las WSN en un área con una capacidad de crecimiento elevada [7].

El abanico de aplicaciones en las que pueden ser integradas las soluciones WSN es amplio, tal y como se puede apreciar en la figura siguiente:

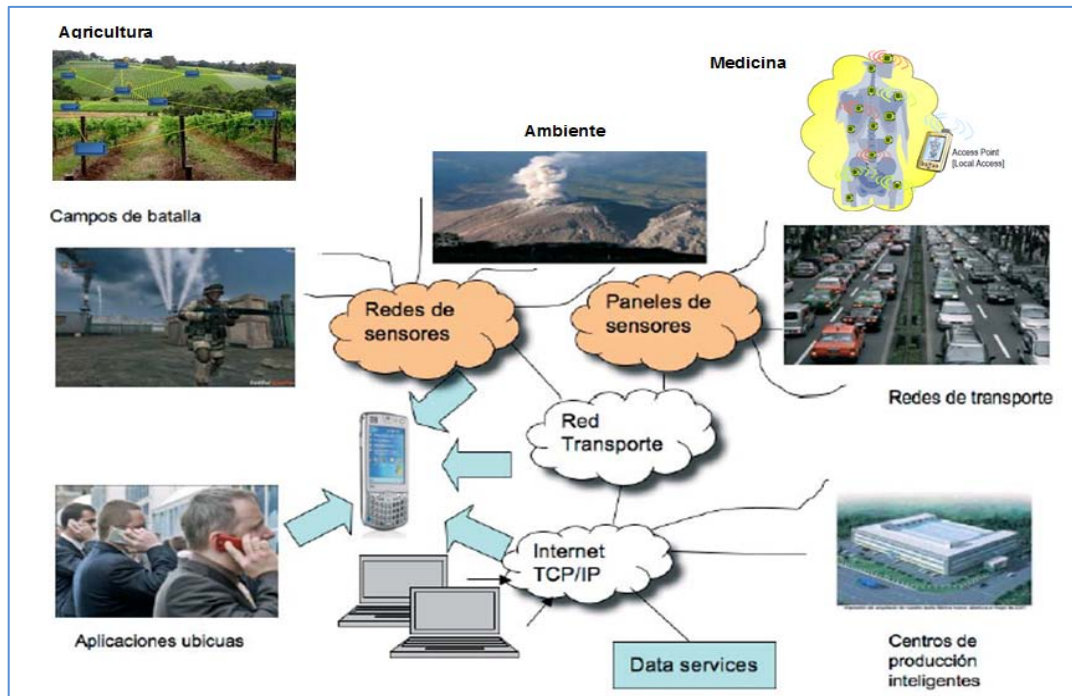


Figura 2. Aplicaciones de las WSN

A continuación se detallan algunas de las aplicaciones en las que se emplean estas soluciones tecnológicas:

2.5.1. Aplicaciones Militares

Los primeros escenarios de la aplicación de las redes de sensores inalámbricos fueron los ambientes militares. La investigación moderna pudo haber comenzado alrededor de 1980 con el proyecto de las redes de sensores distribuidos (DSN) de la agencia militar de investigación avanzada de los Estados Unidos *Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA)* [8].

El apoyo militar fue el primer propósito por el cual empezó a investigarse esta área. Tener conocimiento en tiempo real del campo de batalla es esencial para el control, las comunicaciones y la toma de decisiones. Algunas de las principales características de una red de sensores hacen de ésta una opción especialmente atractiva en el ámbito militar. Características mencionadas como, fácil despliegue, tolerancia a fallos auto-organización, sin atención humana (desatendida), bajo coste, ofrecen la ventaja de que la destrucción de algunos nodos por acciones hostiles en el campo de batalla no comprometen de forma significativa las capacidades de la red. Además, la detección distribuida tiene la ventaja de poder proporcionar información redundante y por lo tanto muy fiable sobre las amenazas, así como la capacidad de localizar las amenazas.

Las WSN muestran una amplia variedad de aplicaciones en los ambientes militares [9], por ejemplo, pueden ser montadas en vehículos robóticos no tripulados, tanques, aviones de guerra, submarinos, misiles, y torpedos para guiarlos a través de obstáculos, hacia una posición exacta y dirigirlos para que coordinen unos con otros para realizar ataques o defensas más efectivas. Además, pueden ser desplegadas para detección remota de armas nucleares, biológicas y químicas, detección de ataques terroristas potenciales, y reconocimiento. Obviamente, las WSN tomarán mayor importancia en las tareas militares y harán de los ataques y defensa mas inteligentes, con menor involucramiento humano.

Algunos ejemplos:

- Portable Intrusion Detection System (PIDS) [10]: equipamiento portátil para detección de intrusos, alimentado con batería, con comunicación remota directa al teléfono móvil o al centro de monitorización, apropiado para todas las aplicaciones de seguridad.
- Control del “fuego amigo”, mediante la localización con sensores de las diferentes tropas y sus dispositivos de armamento.

2.5.2. Aplicaciones en la Agricultura

La agricultura es una de las áreas donde las redes de sensores tienen una gran repercusión. Mediante la utilización de redes de sensores y la medición de determinados parámetros se llevan a cabo las siguientes acciones:

- Control de la cantidad de agua, fertilizante o pesticida que las plantas necesitan.
- Medida de la humedad del suelo.
- Decisión del momento óptimo para realizar la cosecha.
- Optimización de la producción y la calidad de una cosecha.
- Gestión de alarmas por intrusión de animales o daños provocados por heladas.

Como ejemplo, los viñedos Camalie, en Estados Unidos, tienen uno de los sistemas más avanzados de medida de la humedad del suelo. Usan una tecnología inalámbrica desarrollada por la Universidad de Berkeley en colaboración con Intel y comercializada por Crossbow. La aplicación consiste en optimizar la irrigación, reduciendo el consumo de agua y mejorando la calidad de la uva [11].



Figura 3. Nodos implantados para la monitorización de los viñedos.

2.5.3. Aplicaciones en Medio ambiente

Los sensores inteligentes se emplean en el ámbito del medio ambiente en el caso de monitorización y seguimiento del medio ambiente [12], detección de incendios forestales [13] [14] [15] detección de inundaciones, monitorización exhaustiva de zonas de riesgo, explotación de animales en su hábitat natural , entre otras.

En este campo existe un proyecto en el que un equipo de ingenieros de la Universidad de California (Berkely) monitorea el comportamiento de las aves en sus nidos durante ciertas temporadas mediante nodos inalámbricos que reportan la información obtenida de estas aves denominadas *petrels*.

Así, es posible que un grupo de biólogos del Colegio Atlántico observen la actividad de los *petrels* en dicha isla desde sus oficinas mediante el enlace satelital que permite la comunicación de los nodos con la base en California y de vuelta al estado de Maine. Los parámetros de estudio fueron la

cantidad de luz que penetra en los nidos, la temperatura a la que se encuentran, con o sin la presencia de las aves, y la humedad.

En la siguiente figura se observan las posiciones de los sensores desplegados.



Figura 4. Posición de los sensores desplegados en el hábitat del petrel.

2.5.4. Aplicaciones en la Automoción

El abanico de posibilidades que ofrecen los sensores en el ámbito vehicular, y las posibles topologías de red que podemos encontrar son muy numerosos. Sin sensores es casi imposible realizar la gran cantidad de funciones de monitoreo y control en sistemas modernos de gestión del motor, sistemas de seguridad y confort (ASR, ABS, airbag, ajuste del cinturón de seguridad, aire acondicionado, etc.), temas muy actuales del sector automovilístico. Los sensores se usan para registrar de manera precisa los estados reales del motor en funcionamiento, tales como la presión de aceite del motor, la temperatura del motor o el número de revoluciones, enviando esta información a través del CAN BUS [16] (usando el protocolo CAN) a la centralita de control del vehículo. Cada vez se van incorporando un mayor número de sensores en el vehículo, ofreciendo más sistemas de seguridad y confort al conductor. Como

ejemplos de algunos sistemas incorporados últimamente: Iluminación adaptativa, que orienta los focos hacia el interior de las curvas; sistema de encendido automático de luces y del limpiaparabrisas; identificación del conductor mediante tags RFID y tecnología NFC; etc. Además, a lo largo de las carreteras y en el propio asfalto, podemos encontrar cámaras, sensores para medir el número de vehículos que han transitado, estado del pavimento, condiciones climatológicas; que no hacen más que confirmar la importancia de estos elementos en este ámbito.

Existen numerosas iniciativas y consorcios de investigación, que pretenden desarrollar servicios futuristas de muy diversa índole, algunos proyectos de investigación como eCall [17], Trackss[18], Carin Cars[19], hacen uso de sensores para construir las aplicaciones del futuro.

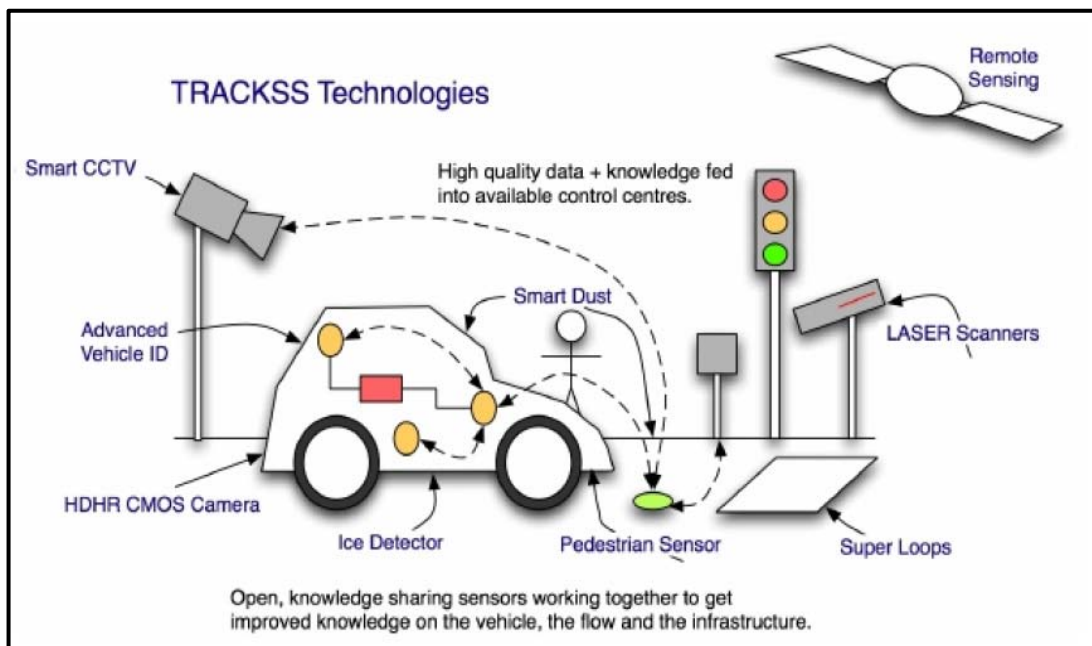


Figura 5: Proyecto Trackss, para mejorar la seguridad y eficiencia del transporte, dando énfasis a la tecnología sensorial.

2.5.5. Aplicaciones en la Domótica

Los servicios que ofrece la domótica en el campo de las redes de sensores inalámbricos cubren diferentes ámbitos o aspectos. El objetivo de emplear estas soluciones en este campo son variados y pueden vincularse desde situaciones de ahorro energético a aplicaciones de seguridad y protección de las personas o bienes patrimoniales. Otros posibles ámbitos de

aplicación son por ejemplo la mejora del confort en la vivienda o disponer de un sistema de comunicaciones o accesibilidad en los hogares.

Por ejemplo, un control eficiente de la energía dedicada al alumbrado de comercios puede llegar a ahorrar un 40% del consumo de energía. A pesar de este ahorro estos sistemas no están nada extendidos en este tipo de construcciones. La meta de esta investigación era reducir el consumo de energía así como crear un entorno de luminosidad ante las preferencias del usuario. Se optó por utilizar WSN ante el mayor precio y menor flexibilidad de un sistema cableado centralizado [20].

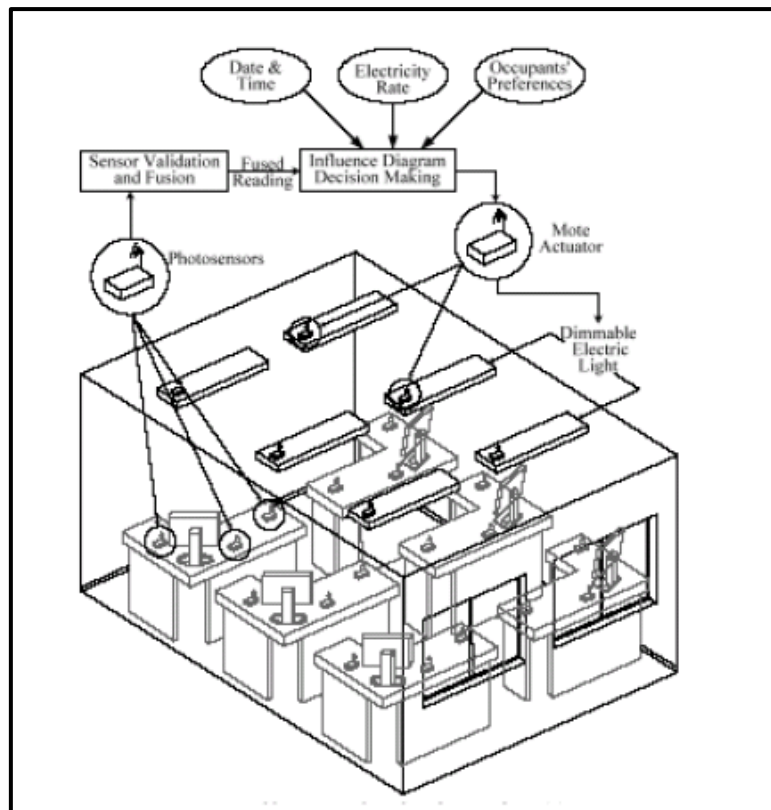


Figura 6. Sistema de iluminación inteligente en oficinas.

2.5.6. Aplicaciones en el Monitoreo de Estructuras

Las estructuras físicas como puentes, edificios y construcciones en general experimentan vibraciones, ya sea ocasionada por actividades normales para las que fueron construidas o por fenómenos naturales. Las variaciones en los comportamientos indican fatiga u otros cambios mecánicos.

En este sentido algunos países como Estados Unidos y Canadá han invertido grandes cantidades de dinero, se estima que como 25 trillones de dólares en estructuras civiles, y ante tanta inversión se desea tener un control de las estructuras realizadas. La tecnología utilizada se llama SHM (Structural Health Monitoring), para la identificación y monitoreo de comportamientos extraños de dichas estructuras [] como puentes, edificios y otras estructuras que fueron edificadas en los años noventa.

Un proyecto que se lleva actualmente en San Francisco, California, es el de evaluar las vibraciones del puente Golden Gate. Una placa de sensores se conecta a una Mica Mote y se coloca en el puente para realizar el análisis de movimiento debido al paso de los automóviles. Un conjunto de nodos sensores posicionados manualmente en el puente se conectan entre si y envían a un control central que almacena y procesa los datos obtenidos [21][22][23].

En la siguiente figura se muestra la colocación de los sensores en el puente.

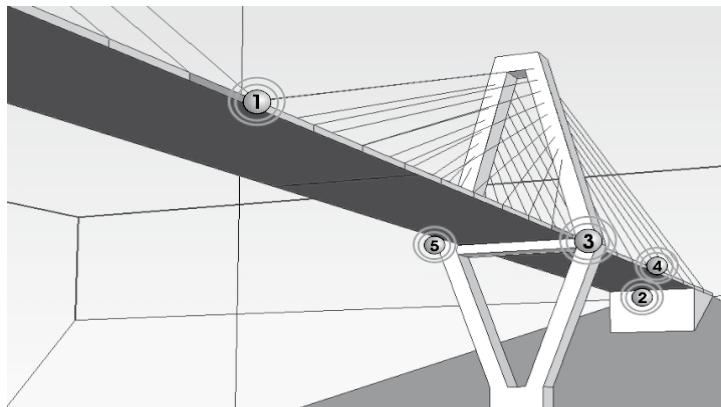


Figura 7: Puente monitoreado con sensores

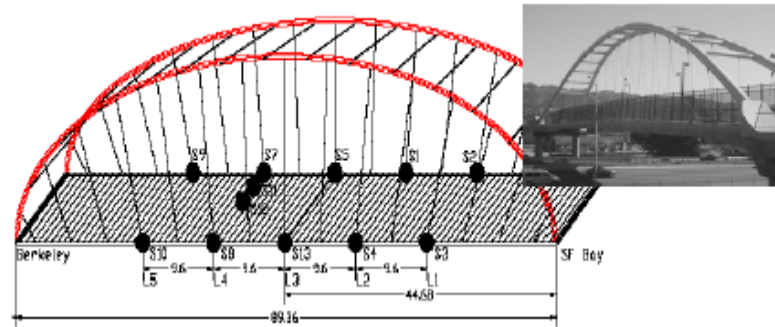


Figura 8. Colocación de los sensores en el puente

2.5.7. Aplicaciones en la Medicina

En los últimos años, las investigaciones y desarrollos de redes de sensores inalámbricos han ido aumentando tanto en el nivel comercial como en el académico para aplicaciones médicas, específicamente para la monitorización de pacientes. En la actualidad existen varios tipos de sensores inalámbricos que ayudan a monitorizar de forma remota y discreta los parámetros vitales del paciente, tales como la frecuencia cardíaca, frecuencia respiratoria, presión arterial; permitiendo la movilidad de los mismos. Más adelante se realizará un estudio más detallado de las aplicaciones de las WSN en el ámbito médico.

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1. Introducción

En esta parte se hablará sobre los distintos factores que afectan a este tipo de redes y otros aspectos que dan una visión a varios niveles de profundidad de los elementos que componen este tipo de redes, y la lógica de funcionamiento que existe entre ellos externa e internamente.

3.2. Factores de diseño en redes de sensores inalámbricos

El diseño de las redes de sensores inalámbricos está afectado por muchos factores, entre las cuales se incluye: tolerancia a fallos, escalabilidad, costes de producción, entorno operativo, topología de la red

de sensores, restricciones de hardware, medio de transmisión y consumo de energía.

Estos factores son importantes ya que sirven de guía para diseñar los distintos protocolos o algoritmos utilizados, adaptándose a una situación particular y son utilizados en muchos casos para comparar distintos esquemas propuestos.

3.2.1. Tolerancia a fallos

En una red de sensores desplegada en el terreno, algunos de los sensores pueden llegar a fallar por varios motivos: Fallo provocado por algún defecto o daño físico, falta o fallo de energía, interferencia del entorno, etc. Sin embargo el fallo de los nodos sensores no debería comprometer el funcionamiento global de la red sensora. Este es el principio de la tolerancia a fallos o fiabilidad.

Por lo tanto, la tolerancia a fallos en una red de sensores es la capacidad de mantener la funcionalidad de la red sin interrupción, aunque fallen algunos de los nodos desplegados.

La fiabilidad $R_k(t)$ o tolerancia a fallos de un sensor es modelado en [24] utilizando una distribución de Poisson para la calcular la probabilidad de tener un fallo en un intervalo de tiempo $(0; t)$.

$$R_k(t) = e^{-\lambda_k t}$$

Donde λ_k es la tasa de fallo de un sensor k en un período de tiempo t .

3.2.2. Escalabilidad

El número de sensores desplegados para estudiar un determinado fenómeno puede ser del orden de cientos o miles y, dependiendo del tipo de aplicación, características del entorno u otros factores, el número puede alcanzar valores extremos, de millones. Los esquemas propuestos deben ser capaces de trabajar con este alto número de nodos y ser capaces de utilizar la alta densidad presente en las redes de sensores.

La densidad μ puede ser calculada de acuerdo con [25] como:

$$\mu(R) = \frac{(N \pi R^2)}{A}$$

Donde N es el número de sensores dispersos en una región A y R es el alcance del radio de transmisión. Básicamente, $\mu(R)$ proporciona el número de nodos dentro del radio de transmisión de cada nodo en la región A .

3.2.3. Costes de producción

Dado que las redes de sensores están formadas por un gran número de sensores, el coste de un nodo individual que conforma esta red es muy importante para justificar el coste total de la red. Si el coste de una red de este tipo es más caro que el despliegue de sensores tradicionales, en muchos casos, no justificaría su uso desde el punto de vista económico.

El coste de una interfaz radio Bluetooth, que es conocida por ser un dispositivo de bajo coste, es aún 10 veces más caro que el precio perseguido para un nodo sensor. Por lo tanto, el coste de un sensor tiene que ser lo bastante económico para que esté justificado por su coste.

3.2.4. Restricciones de hardware

Para poder conseguir un consumo ajustado, se hace indispensable que el hardware sea lo más sencillo posible, así como su transceptor de radio, esto nos deja una capacidad de proceso limitada. Por ejemplo la radio utilizada tiene que emplear un protocolo de bajo consumo de energía.

3.2.5. Topología de la red de sensores

El despliegue de un alto número de nodos que pueden estar a pocos metros unos de otros hace necesario un manejo cuidadoso en el mantenimiento de la topología. Pueden identificarse tres frases relacionadas en las cuestiones de mantenimiento y cambio en una red de sensores:

Fase de despliegue y preparación previa: Los nodos sensores pueden ser desplegados de variadas formas en la zona de estudio: De forma masiva, desde un aeroplano, artillería o depositados uno a uno por un ser humano, robot o cualquier otro medio

Fase posterior al despliegue: Una red de sensores después del despliegue puede tener frecuentes cambios por diversos factores, y esto puede provocar variaciones en la topología.

Los cambios en la topología pueden ser debidos a: cambios en la posición de los nodos sensores, capacidad de alcance (debido a interferencias intencionadas (jamming), ruido, obstáculos móviles, etc), mal funcionamiento y otros detalles de las tareas encomendadas.

Nuevas fases de despliegue: Podría llegar a ser necesario una nueva fase de despliegue por varios motivos, como reemplazar los nodos sensores defectuosos que han fallado en la fase anterior, o por necesidades de cambio en la dinámica de una tarea.

3.2.6. Entorno

Los Nodos sensores son densamente desplegados en áreas geográficas remotas y desatendidas, son desplegados bien muy cerca o directamente en el interior del fenómeno a ser observado. Están sometidos a un gran número de condiciones adversas: Contaminación biológica o química, campo de batalla, en un edificio, una fábrica, sometidos a una gran presión atmosférica o temperaturas extremas, entornos con una gran cantidad de ruido electromagnético, etc. Esta gran variedad de escenarios y condiciones extremas donde pueden estar obligadas a trabajar, tiene una gran influencia que debe considerarse en aspectos como, por ejemplo, comunicación entre nodos y tasa de fallos.

3.2.7. Medio de transmisión

En una red de sensores conectados inalámbricamente, la comunicación entre nodos se pueden establecer mediante: radio, sistemas ópticos o infrarrojos. Mucho del hardware actual para nodos sensores está basado en circuitos de diseño de RF.

En el caso de las restricciones de hardware aplicables a redes de sensores de bajo consumo y bajo coste, existe un gran número de componentes basados en la banda ISM (Industrial, Scientific and Medical) de 433 y 915 MHz o circuitos RF operando en el rango de, 2.4 GHz. El dispositivo

sensor de bajo consumo descrito en [26] utiliza un transceptor RF de un solo canal que opera a 916 Mhz.

Otro modo de comunicación entre nodos en WSN es mediante la comunicación por infrarrojos, la cual no necesita licencia y es robusta frente a interferencias producidas por dispositivos eléctricos. Los transceptores basados en infrarrojos son baratos y fáciles de construir.

Otro desarrollo interesante es el del Smart Dust [27], que es un sistema autónomo de percepción, computación y comunicación que utiliza el medio óptico para transmitir. Ambos medios, infrarrojos y ópticos requieren de visión directa entre el nodo o nodos transmisores y receptores.

3.2.8. Consumo de energía

Un nodo sensor Wireless está generalmente equipado con una fuente limitada de energía. En muchos escenarios, la utilización de una fuente de energía alternativa es imposible, limitando la fuente de energía del nodo al uso de baterías o acumuladores. La vida útil del sensor queda limitada entonces al tiempo de vida útil de la batería.

Debido a la naturaleza de este tipo de redes, cada uno de sus elementos juega dos papeles principales dentro de ella: Generador (datos locales) y enrutador (datos externos). El fallo de alguno de ellos implica un cambio en la topología y obliga a la reorganización de la red, modificando las tablas de routing de los nodos, por ejemplo.

La conservación y gestión de energía adquiere una importancia adicional; motiva el empleo y desarrollo de nuevos protocolos y algoritmos. Las principales tareas de un nodo sensor son: Detectar eventos, realizar un mínimo tratamiento de datos local y finalmente transmisión y retransmisión de datos. El consumo de energía se distribuye entonces en tres dominios principales: Detección, comunicación y procesamiento de datos.

3.3. Arquitectura de un Nodo

La arquitectura de un nodo sensor consta básicamente de cuatro componentes clave: Unidad de detección (o sensores), unidad de proceso, transceptor y módulo de alimentación. Este diseño básico podría ampliarse

dependiendo de la necesidad de las aplicaciones o la especialización del hardware, incluyendo módulos como un generador de energía, un sistema de movilidad o un sistema de localización o posicionamiento.

3.3.1. Componentes de un nodo sensor Wireless

Los cuatro componentes básicos que componen el hardware de un nodo pueden apreciarse en la siguiente figura.

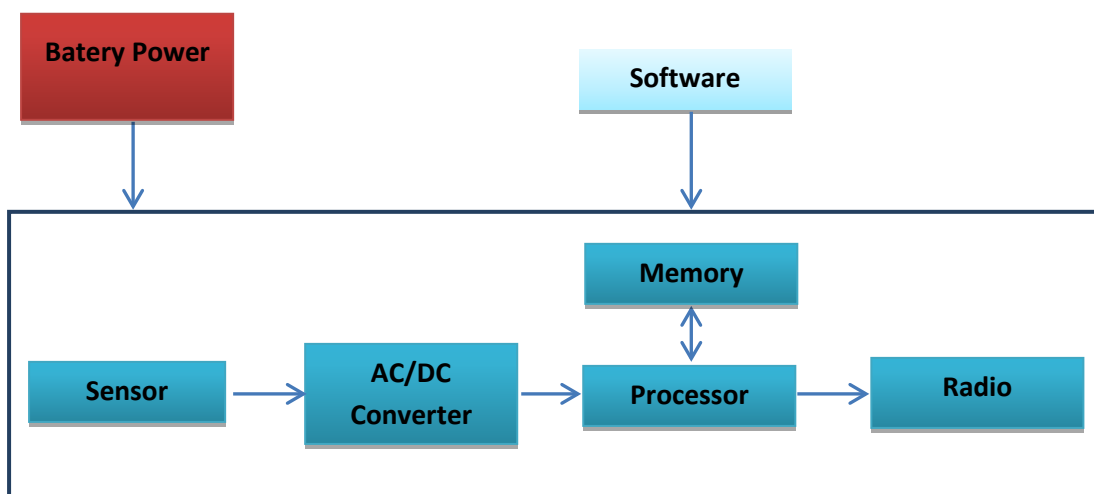


Figura 9: Arquitectura de un nodo

Figura 9. Un nodo de una WSN integra detección, procesamiento de la señal, recolección y almacenamiento de la información, computación, y comunicaciones inalámbricas, con el abastecimiento de energía adjunto en un solo chip.

3.3.1.1. Fuente de energía

Un suministro de energía apropiado debe ser capaz de alimentar al nodo durante horas, meses o años, dependiendo de la aplicación. Como ejemplo de plataforma desatendida, suelen incorporar una alimentación mediante un sistema de alimentación autónomo (generalmente baterías), combinado con alguna fuente de recarga (células solares, p.e.) o energía auxiliar. Estas estrategias de recarga suelen dar buen resultado en operaciones donde no es posible llevar a cabo un reemplazo de la batería.

Ante la limitación de vida útil del dispositivo hay que realizar una gestión eficiente del consumo energético. El consumo de energía viene dado por lo que consumen los sensores, la comunicación y el procesado. La mayor cantidad de energía es consumida en la transmisión de la información, siendo menor en el procesado y uso de los sensores.

3.3.1.2. Microcontrolador.

Es el componente que proporciona la lógica computacional y de almacenamiento. Incluye un microprocesador y memoria. Utilizado en tareas de procesamiento y manipulación de datos, almacenamiento transitorio, cifrado, corrección de errores (FEC), modulación y transmisión digital. Los requisitos de cómputo y almacenamiento en una WSN dependen de la aplicación y pueden ir desde la utilización de un microcontrolador de 8 bits hasta 64 bits. Los requerimientos de almacenamiento pueden igualmente oscilar entre 0,01 hasta 100 gigabytes (GB).

Además de la memoria proporcionada por el microcontrolador no es extraño encontrar modelos que incluyan memoria externa adicional, por ejemplo en forma de memoria flash.

Actualmente procesadores de bajo consumo más utilizados son los siguientes [7]:

- **ARM7:** Se denomina ARM a una familia de microprocesadores RISC diseñados por la empresa Acorn Computers y desarrollados por Advanced RISC Machines Ltd., una empresa derivada de la anterior.
<http://www.arm.com/>
- **Atmel AVR:** Los AVR son una familia de microcontroladores RISC de Atmel. La arquitectura de los AVR fue concebida por dos estudiantes en el Norwegian Institute of Technology, y posteriormente refinada y desarrollada en Atmel Norway, la empresa subsidiaria de Atmel, fundada por los dos arquitectos del chip.

El AVR es una CPU de arquitectura Harvard. Tiene 32 registros de 8 bits. Algunas instrucciones solo operan en un subconjunto de estos registros. <http://www.atmel.com/products/avr/>

- **Intel Xscale:** El Intel XScale es un núcleo de microprocesador, la implementación de Intel de la quinta generación de la arquitectura ARM. La tecnología fue vendida a Marvell Technology Group en junio de 2006.

Esta basado en el ISA v5TE sin las instrucciones de coma flotante. El XScale usa un entero de 7 niveles y 8 niveles de memoria Superpipeline de arquitectura RISC. Es el sucesor de la línea de microprocesadores y microcontroladores IntelStrongARM, que Intel adquirió de la división de Semiconductores Digitales de DEC como efecto colateral de un pleito entre las dos compañías.

<http://www.marvell.com/>

- **Intel 8051:** El Intel 8051 es un microcontrolador (μ C) desarrollado por Intel en 1980 para uso en productos embebidos. Es un microcontrolador muy popular. Los núcleos 8051 se usan en más de 100 microcontroladores de más de 20 fabricantes independientes como Atmel, Dallas Semiconductor, Philips, Winbond, entre otros. La denominación oficial de Intel para familia de μ Cs 8051 es MCS 51. Este microcontrolador esta basado en una Arquitectura Harvard (es decir, existen espacios de direcciones separados para código y datos). Aunque originariamente fue diseñado para aplicaciones simples, se permite direccionar 64 KB de ROM externa y 64 KB de RAM por medio de líneas separadas chip select para programa y datos. <http://www.intel.com/design/mcs51/>
- **PIC:** Los 'PIC' son una familia de microcontroladores tipo RISC fabricados por Microchip Technology Inc. y derivados del PIC1650, originalmente desarrollado por la división de microelectrónica de General Instruments.

El nombre actual no es un acrónimo. En realidad, el nombre completo es PICmicro, aunque generalmente se utiliza como Peripheral Interface Controller (Controlador de Interfaz Periférico).

<http://www.microchip.com/>

- **TI MSP430:** El MSP430 es una familia de microcontroladores producidos por Texas Instruments. Construido con una CPU de 16 bits, el MSP430 está diseñado para aplicaciones empotradas de bajo coste y bajo consumo de energía. La arquitectura tiene reminiscencias del DEC PDP-11. Desafortunadamente, el MSP430 carece de una característica muy importante del PDP11, la cual era la memoria para indexar memoria. Esta característica permitía que las rutinas de interrupción se escribieran sin utilizar registros, por lo que no requería apilamientos. El MSP430 es muy útil para aplicaciones inalámbricas o para aplicaciones de bajo consumo.

<http://www.ti.com/msp430>

3.3.1.3. Unidad/es de detección o sensores

Son el medio de comunicación entre el entorno, la red y el sensor.

Un sensor es un dispositivo de hardware que mide alguna cantidad física en el área que están monitorizando y la convierte en una señal. Esta señal analógica continua detectada, es digitalizada por un convertidor analógico digital y enviada para ser procesada por el microcontrolador.

Entre la amplia gama **de tipos de sensores** existentes figuran los sensores de aceleración, sísmicos, humedad, iluminación, presión, sonido, térmicos, acústicos, visuales, infrarrojos y magnéticos.

Los sensores pueden estar clasificados en tres categorías:

Sensores pasivos omnidireccionales: Captan los datos sin necesidad de manipular el entorno. Son autoalimentados y solo usan la energía para amplificar la señal analógica captada. No hay ninguna noción de “dirección” involucrada en estas mediciones.

Sensores pasivos unidireccionales: Son sensores pasivos que tienen bien definida la dirección desde donde deben captar la información. Un ejemplo típico es una cámara.

Sensores activos: Este tipo de sensores sondean el ambiente, por ejemplo un radar o algún tipo de sensor que genera ondas expansivas a través de pequeñas explosiones.

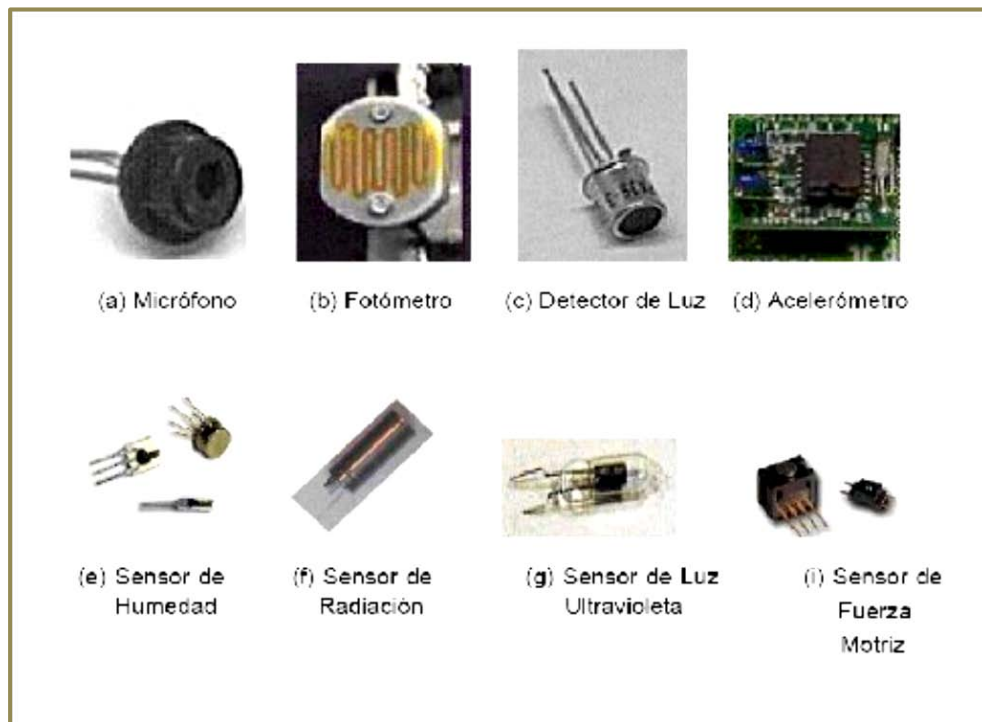


Figura 10: Diferente tipos de sensores

La tendencia es producir sensores a gran escala, precios bajo, con mejor capacidad de cómputo y de tamaño reducido como se observa en la Figura 11: Tamaño de los sensores.

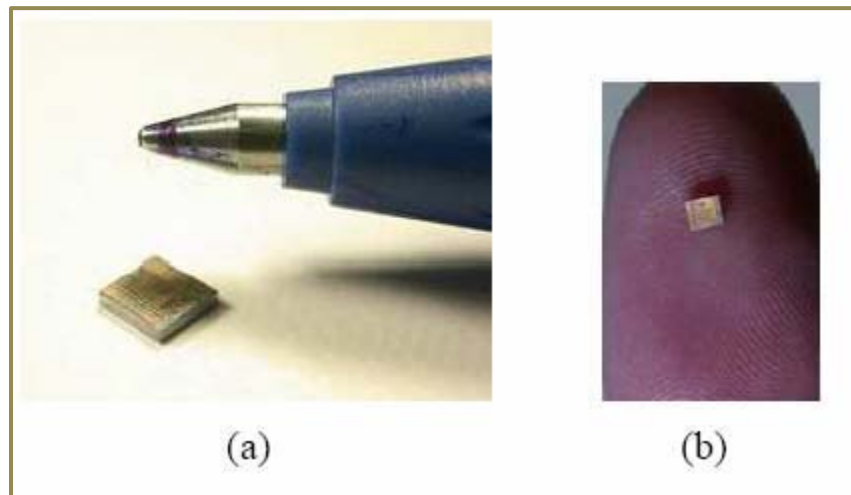


Figura 11: Tamaño de los sensores.

3.3.1.4. Radio

El dispositivo de radio (por ejemplo, radio CC2420 de los productos Chipcon) proporciona comunicación inalámbrica al nodo sensor, y es compatible con las propiedades específicas de comunicación de las WSN tales como: bajo consumo de energía y velocidad de datos, y distancias cortas. Algunos dispositivos de radio para motes son la después.

3.4. Comparativa de las motas o nodos inalámbricos

En la siguiente Tablas 1 podemos comparar las principales características de los nodos inalámbricos para poder tener un conocimiento más detallado del mismo [7].

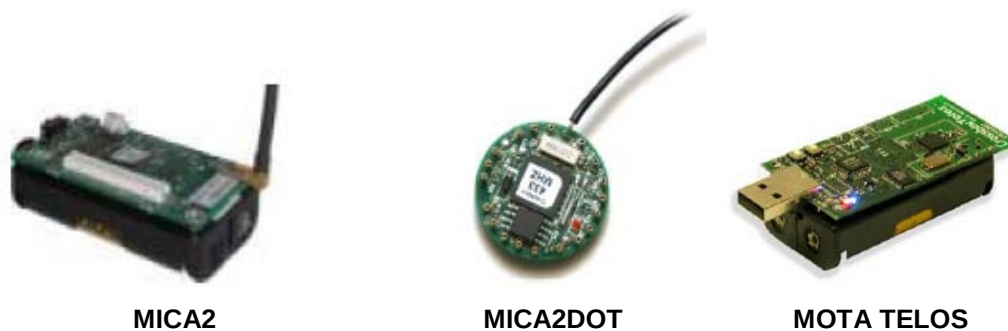


Figura 12: Familia de Motas Mica y Telos.



SQUIDBEE



ez430-RF2480



ARDUINO

Figura 13: Motas

Tabla 1. Comparativa de nodos inalámbricos

Nombre	Compañía	Microcontrolador	Memoria Programas	SRAM	Memoria Datos	Transceptor	Frecuencia	Protocolo	Max. Tx.	Aliment.
Imote2	Crossbow	Marvell PXA271	32 MB	256 kB	32 MB	CC2420	2400 MHz	802.15.4	250 kbps	3XAAA
IRIS	Crossbow	ATmega1281	128 kB	8 kB	512 kB	RF230	2400 MHz	802.15.4/ ZigBee	250 kbps	2xAA
Micaz	Crossbow	ATmega128L	128 kB	4 kB	512 kB	CC2420	2400 MHz	802.15.4/ ZigBee	250 kbps	2xAA
TelosB	Crossbow	TIMSP430	48 kB	10 kB	1024 kB	CC2420	2400 MHz	802.15.4	250 kbps	2xAA/US B
WeBee 3	ceesar.ch	Intel 8051	128 kB	8 kB	-	CC2430/ CC2431	2400 MHz	802.15.4/ ZigBee	250 kbps	Sanyo CR1/3NT1
WeBee 4	ceesar.ch	16 bit XAP2b	128 kB	85 kB	-	Ember EM250	2400 MHz	802.15.4/ ZigBee	250 kbps	-
SquidBee Arduino	Libelium CD	ATmega 168	16 kB	1 kB	-	XBee ZNet 2.5	2400 MHz	802.15.4/ ZigBee	250 kbps	Batería 9V
KMote	Texas Instruments	TIMSP430	48 kB	10 kB	-	CC2420	2400 MHz	802.15.4	250 kbps	2xAA
TIP700CM	Max For	MSP430F1611	48 kB	10 kB	1 MB	TR1000	2400 MHz	802.15.4	250 kbps	2xAA
zPart	teco.edu	PIC 16F672x	14 kB	4 kB	512 kB	CC2420	2400 MHz	802.15.4/ ZigBee	250 kbps	Regulable
FireFly	Carnegie Mellon University	ATmega1281 MSP430F161	128 kB	8kB	Slot SD	CC2420 WML-C46A	2400 MHz	802.15.4 Bluetooth	250 kbps	2xAA
TriBee Ember TriBee	Tritech	XAP2B	8kB	5kB	128 kB	EM250	2400 MHz	802.15.4/ ZigBee	250 kbps	-
SunSPOT	Sun Microsystems	ARM920T	-	512 kB	4MB	CC2420	2400 MHz	802.15.4	250 kbps	Batería 3,7 V

3.5. Estándar IEEE 802.15.4 y Zigbee

Todo sistema u organización de elementos se debe regir según normas que reglamenten su funcionamiento y aplicación. Las Redes de Sensores Inalámbricos no son la excepción. Este tipo de sistema se comunica a través de señales de radio, por lo cual tiene asignado un espectro de la señal electromagnética para conseguir la comunicación entre los dispositivos de la red. El estándar que fija las condiciones para que este enlace se produzca es el IEEE 802.15.4, existen más pero éste es el estándar más empleado. El IEEE 802.15.4 sirve de base para otras especificaciones como ZigBee [7] cuyo propósito es ofrecer una solución completa para este tipo de redes definiendo los niveles superiores de la pila de protocolos que el estándar 802.15.4 no cubre.

3.5.1. Estándar IEEE 802.15.4

El estándar IEEE 802.15.4 [28][29], cuya última revisión se aprobó en 2006, define una capa de comunicación que se encuentra en el nivel 2 (Enlace de datos) del modelo OSI. Aquí las unidades de la información digital (bits) son gestionados y organizados para convertirse en impulsos electromagnéticos (ondas) en el nivel inferior, el físico. Su objetivo principal es permitir la comunicación entre dos dispositivos. La característica más importante de este estándar es su flexibilidad de red, bajo coste, bajo consumo de energía.

Este estándar fue creado para llenar el hueco existente en el campo de estándares inalámbricos de baja tasa para aplicaciones en redes de sensores. Los estándares existentes hasta el momento en el mercado estaban destinados a aplicaciones con mayores requisitos en cuanto a ancho de banda se refiere, como pueden ser videoconferencias o redes domésticas.

Los ejemplos más representativos de estas tendencias son:

- IEEE 802.11 [30], también conocido como Wi-Fi

- IEEE 802.15.1 [31] conocido como Bluetooth, que es una tecnología de red inalámbrica de baja potencia y baja tasa para comunicaciones punto a punto.
- IEEE 802.15.3: WPAN (*Wireless Personal Area Network*) de alta tasa de datos. Se utiliza en aplicaciones que requieren alta tasa de datos o una gran cobertura, lo que supone soluciones complejas con elevado consumo de potencia.

La dificultad que surgía al emplear cualquiera de éstos estándares, era su gran consumo de energía y ancho de banda frente a la baja tasa y bajos requisitos de energía necesaria para las redes de sensores. En el caso de Bluetooth no está diseñado para soportar la comunicación entre redes de varios nodos, por tanto, se necesita un nuevo estándar (IEEE 802.15.4) que cumpla con los siguientes criterios [32]:

- Baja complejidad.
- Muy bajo consumo de energía.
- Baja tasa de datos.
- Radio de cobertura relativamente pequeño.
- Uso de bandas de radiofrecuencia sin licencia.
- Fácil instalación.
- Bajo coste.

El requisito fundamental del estándar IEEE 802.15.4 es un consumo de potencia extremadamente bajo. Su eficiencia energética de este protocolo reside fundamentalmente en el uso de las tramas “Beacon”, que permiten sincronizar los dispositivos de la red para que puedan permanecer en modo ahorro de energía el mayor tiempo posible, esto supone una gran ventaja para el desarrollo WSN que realicen tanto tareas de monitorización como de control. El inconveniente es que, debido al bajo consumo de potencia, el radio de cobertura se ve reducido

La siguiente Tabla 2, muestra una pequeña comparativa entre el estándar 802.15.4 y otros estándares como el Bluetooth y Wi-Fi:

Estándar	Ancho de banda	Consumo de potencia	Ventajas	Aplicaciones
Wi-Fi	Hasta 54 Mbps	400 mA transmitiendo 20 mA en reposo	Gran ancho de banda	Navegar por Internet, redes de ordenadores, transferencia de ficheros
Bluetooth	1 Mbps	40 mA transmitiendo 0.2mA en reposo	Interoperatividad, sustituto del cable	Wireless USB, móviles, informática doméstica
802.15.4	250 Kbps	1,8 mA transmitiendo 5,1 μ A en reposo	Batería de larga duración, bajo coste	Control remoto, productos dependientes de la batería, sensores etc.

Tabla 2. Comparativa estándares Wireless

Las frecuencias definidas por el estándar IEEE 802.15.4 se reparten entre los 27 canales disponibles y las bandas de frecuencias respectivas que se muestran en la Tabla 3.

Banda RF	Rango de frecuencias (MHz)	Tasa de datos (Kbps)	Número de canal	Área geográfica
868 MHz	868,3	20	0(1 canal)	Europa
915 MHz	902-928	40	1-10 (10 canales)	América, Australia
2400 MHz	2405-2480	250	11-26 (16 canales)	Todo el mundo

Tabla 3. Bandas de frecuencia utilizadas por el estándar IEEE 802.15.4

La tecnología inalámbrica basada en IEEE 802.15.4 permite comunicaciones de corto alcance con distancias de hasta 75 m y bajo consumo; está diseñado para utilizar bandas de frecuencia sin licencia. Pueden funcionar en las bandas 868 MHz, 915 MHz y 2400 MHz, aunque la banda de 2400 MHz es la más utilizada por las siguientes razones:

- Uso sin licencia disponible en todo el mundo.

- Tasa de datos más alta y mayor número de canales.
- Menor consumo de potencia (debido a que se tarda menos tiempo en enviar y recibir porque la tasa de datos es mas alta).
- Banda de frecuencias comúnmente empleada en el mercado (también utilizada por Bluetooth y el estándar IEEE 802.11).

Las técnicas que utiliza este estándar para evitar que todos los nodos emitan al mismo tiempo son:

- **CSMA-CA:** Cada nodo debe analizar la red antes de transmitir. Si la energía más alta se encuentra en un nivel específico, el nodo espera al transceptor durante un tiempo al azar e intenta de nuevo.
- **GTS:** La segunda es una garantía de tiempo. Este sistema utiliza un nodo central (PAN coordinador), que da las franjas horarias de tiempo para cada uno de los nodos de modo que cualquier nodo sabe cuando tiene que transmitir.

3.5.2. Arquitectura del estándar IEEE 802.15.4

La arquitectura definida en el estándar IEEE 802.15.4 se divide en dos niveles: capa física y subcapa MAC (junto con la subcapa LLC). El conjunto de subcapa MAC y subcapa LLC se conoce como capa de enlace de datos. La arquitectura descrita se muestra en la Figura 14:

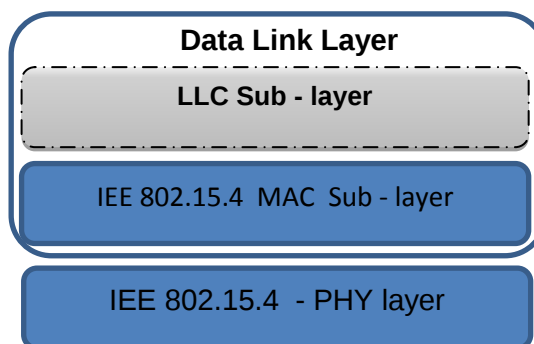


Figura 14. Arquitectura de IEEE 802.15.4

A continuación se definen las funciones y servicios de ambas capas:

➤ **Capa física**

La capa física actúa como interfaz con el medio físico de transmisión, radio en este caso, e intercambia bits de datos con el medio y con la capa superior, la subcapa MAC.

Las funciones de la capa física con el medio son las siguientes:

- Estimación del canal.
- Comunicaciones a nivel de bit (modulación y demodulación de bits y sincronización de paquetes).

La capa física ofrece a la subcapa MAC los siguientes servicios:

- PHY Data Service: proporciona un mecanismo de envío de datos a la subcapa MAC.
- PHY Management Services: proporciona mecanismos para controlar la configuración y la funcionalidad de las comunicaciones radio a la subcapa MAC.

La información necesaria para gestionar la capa física se almacena en una base de datos llamada *PHY PIB*.

➤ **Subcapa MAC**

Las funciones principales de la subcapa de control de acceso al medio (MAC) son las siguientes:

- Proporcionar servicios para que los dispositivos puedan asociarse o desasociarse de la red.
- Proporcionar control de acceso a los canales compartidos.
- Generación de beacons, si procede.
- Gestión de Guaranteed Timeslot (GTS), si procede.

La subcapa MAC ofrece a la capa superior los siguientes servicios:

- MAC Data Service (MCPS): proporciona un mecanismo de envío de datos a la capa superior.
- MAC Management Services (MLME): proporciona mecanismos para controlar la configuración y la funcionalidad de las comunicaciones radio y de red de la capa superior.

La información necesaria para gestionar la subcapa MAC se almacena en una base de datos llamada *MAC PIB*.

3.5.3. ZigBee

ZigBee es un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica. Su objetivo son las aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías.

Fue un proyecto formado por seis promotores (Honeywell, Invensys, Mitsubishi, Motorola, Philips, y Samsung) y más de 80 participantes. El primer perfil se declaró a mediados de 2003, se definieron especificaciones globales de aplicaciones inalámbricas fiables, económicas y de baja potencia basadas en la norma IEEE 802.15.4. El siguiente diagrama muestra la organización básica:

Las características básicas de ZigBee son [33]:

- Menor potencia y menor coste que otras WPAN (como Bluetooth).
- Potencia Tx 1mW(hasta 10mW en CE, hasta 100 mW en EEUU)
- Los nodos están gran parte del tiempo “dormidos” (Larga duración: 2 años).
- Rango alcance: 10-100 m, hasta 400 m con 10 mW).
- Bit-rate entre los 20kB/s y 250kB/s.
- Se permiten hasta un total de 65534 nodos/red.
- 3 bandas comunicación: 868MHz, 915MHz, 2.4GHz

3.6. Protocolos de enrutamiento para WSN

Los nodos no tienen un conocimiento de la topología de la red, deben descubrirla. La idea básica es que cuando un nuevo nodo, al aparecer en una red, anuncia su presencia y escucha los anuncios broadcast de sus vecinos. El nodo se informa acerca de los nuevos nodos a su alcance y de la manera de enrutarse a través de ellos, a su vez, puede anunciar al resto de nodos que pueden ser accedidos desde él. Transcurrido un tiempo,

cada nodo sabrá que nodos tiene alrededor y una o más formas de alcanzarlos.

Los algoritmos de enrutamiento en redes de sensores inalámbricas tienen que cumplir las siguientes normas:

- Mantener una tabla de enrutamiento razonablemente pequeña
- Elegir la mejor ruta para un destino dado (ya sea el más rápido, confiable, de mejor capacidad o la ruta de menos coste)
- Mantener la tabla regularmente para actualizar la caída de nodos, su cambio de posición o su aparición
- Requerir una pequeña cantidad de mensajes y tiempo para converger

3.6.1. Modelos de enrutamiento

3.6.1.1. Modelo de un salto

Este es el modelo más simple y representa la comunicación directa. Todos los nodos en la red transmiten a la estación base. Es un modelo caro en términos de consumo energético, así como inviable porque los nodos tienen un rango de transmisión limitado. Sus transmisiones no pueden siempre alcanzar la estación base, tienen una distancia máxima de radio, por ello la comunicación directa no es una buena solución para las redes inalámbricas.

3.6.1.2. Modelo Multi-hop

En este modelo, un nodo transmite a la estación base reenviando sus datos a uno de sus vecinos, el cual está más próximo a la estación base, a la vez que este enviará a otro nodo más próximo hasta que llegue a la estación base. Entonces la información viaja de la fuente al destino salto a salto desde un nodo a otro hasta que llega al destino. En vista de las limitaciones de los sensores, es una aproximación viable. Un gran número de protocolos utilizan este modelo, entre ellos todos los MultiHop de Tmote Sky y Telos: MultiHop LQI, MintRoute, Router, etc.

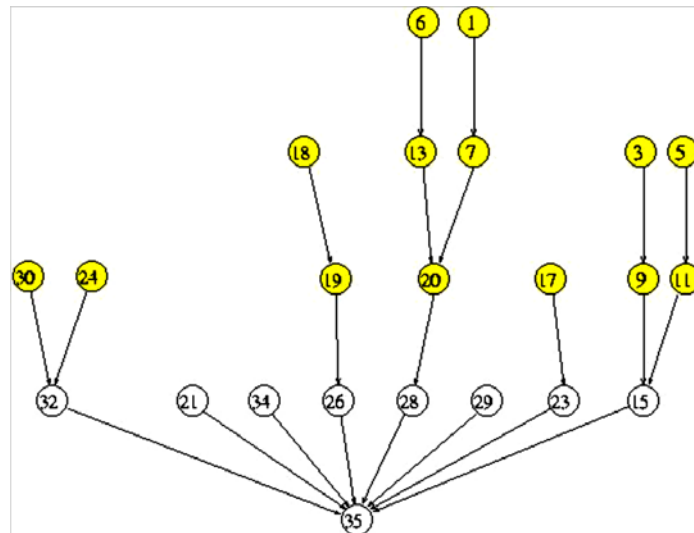


Figura 15. Aquí mostramos una red de motas donde la mota base es la 35, el resto de motas envían sus datos ha ella con una profundidad máxima de 4 saltos (hops) para las motas.

3.6.1.3. Modelo esquemático basado en clústeres

Algunos otros protocolos usan técnicas de optimización para mejorar la eficacia del modelo anterior. Una de ellas es la agregación de datos usada en todos los protocolos de enrutamiento basados en clústeres. Una aproximación esquemática rompe la red en capas de clústeres. Los nodos se agruparán en clústeres con una cabeza, la responsable de enlutar desde ese clúster a las cabezas de otros clústeres o la estación base. Los datos viajan desde un clúster de capa inferior a uno de capa superior. Aunque, salta de uno a otro, lo está haciendo de una capa a otra, por lo que cubre mayores distancias. Esto hace que, además, los datos se transfieran más rápido a la estación base.

Teóricamente, la latencia en este modelo es mucho menor que en la de MultiHop. El crear clústeres provee una capacidad inherente de optimización en las cabezas de clúster. Por tanto, este modelo será mejor que los anteriores para redes con gran cantidad de nodos en un espacio amplio (del orden de miles de sensores y cientos de metros de distancia).

3.7. Sistema Operativo para Nodos Sensores

Las necesidades que tiene un nodo de una WSN son totalmente distintas a las que pueda tener otro dispositivo como puede ser un PC, por lo tanto estos nodos tienen sus propios sistemas operativos.

Los sistemas operativos para WSN [7] son típicamente menos complejos que los de propósito general, tanto debido a los requisitos especiales de las aplicaciones en las que se usan, como a las restricciones de recursos encontradas en las plataformas para PC y debido a esto, estos sistemas no necesitan incluir el soporte de interface de usuario. Además, las restricciones de los recursos en términos de memoria hace imposible de implementar los mecanismos de memoria virtual.

El hardware de las redes inalámbricas de sensores no es muy diferente al de sistemas empotrados tradicionales y por lo tanto es posible utilizar sistemas como Mantis, eCos o uC/OS. Sin embargo, estos sistemas están diseñados para usar operaciones en tiempo real. A diferencia de los tradicionales sistemas operativos para sistemas empotrados, los sistemas desarrollados para redes de sensores inalámbricas no tienen como objetivo apoyar operaciones en tiempo real.

A continuación se describe algunos sistemas operativos conocidos en el ámbito de las WSN [7]:

3.7.1. Sistema operativo TINYOS

El diseño de TinyOS [34] desarrollado por la Universidad de Berkeley, está basado en responder 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.

TinyOs es quizás el primer sistema operativo diseñado específicamente para redes de sensores inalámbrica. A diferencia de la mayoría de los otros sistemas operativos, TinyOS se basa en un modelo de la

programación controlado por eventos en vez de multiprocesos. Los programas de TinyOS están compuestos por eventos y tareas guiadas.

Tanto TinyOS como los programas escritos para él son escritos en un lenguaje de programación especial llamado nesC [35], que es una extensión del lenguaje de programación C. NesC está diseñado para determinar las propiedades entre tareas y eventos.

El diseño del Kernel (núcleo) de TinyOS está basado en una estructura de dos niveles de planificación.

- Eventos: Pensados para realizar un proceso pequeño (por ejemplo cuando el contador del timer se interrumpe, o atender las interrupciones de un conversor análogo-digital). Además pueden interrumpir las tareas que se están ejecutando.
- Tareas: Las tareas están pensadas para hacer una cantidad mayor de procesamiento y no son críticas en tiempo. Las tareas se ejecutan en su totalidad, pero la solicitud de iniciar una tarea, y el término de ella son funciones separadas.

Con este diseño permitimos que los eventos (que son rápidamente ejecutables), puedan ser realizados inmediatamente, pudiendo interrumpir a las tareas (que tienen mayor carga computacional en comparación a los eventos) [36].

3.7.2. Sistema operativo Contiki.

Es un pequeño sistema operativo de código abierto, altamente portable y multitarea, desarrollado específicamente para su implementación en sistemas empuados, como son microcontroladores o nodos WSN. Aunque incluye el gestor de tareas y varias pilas de protocolos de comunicaciones (TCP/IP, por ejemplo) es un sistema ligero, tanto en el tamaño de los programas como en el uso de la memoria RAM. Esto se consigue con un sistema basado en eventos, que carga y descarga dinámicamente los programas en los hilos correspondientes según se va ejecutando la aplicación [37].

3.7.3. Sistema operativo eCos (embedded Configurable operating system)

Es un sistema operativo de código abierto, gratuito y de tiempo real desarrollado para sistemas empujados y para aplicaciones que necesitan un procesador multisesión. Desarrollado en C, con capas y APIs compatibles con POSIX y uLTRON, es personalizable según la aplicación, aunque es indicado especialmente para aquellos dispositivos que cuenten con muy poca memoria RAM. Además eCos tiene una estrecha relación con los sistemas UNIX, siendo posible incluso soportar sistemas Linux empujados [38].

3.7.4. Sistema operativo MANTIS (Multimodal system for Networks of In-situ Wireless Sensors)

Es un reciente sistema operativo empujado multiplataforma específico para redes de sensores inalámbricos. Ante el incremento de complejidad en las tareas realizadas por las redes de sensores como comprensión, agregación y procesamiento de señales, los procesos múltiples en Mantis sensor OS (MOS) permite interpaginar tareas complejas con tareas susceptibles de manera que se mitiguen los problemas de overflows en los buffers. Otra característica importante de MANTIS es su eficiente uso de la memoria RAM (menos de 500 bytes incluyendo el kernel, los controladores y la pila de comunicaciones) y de la energía (incluye un modo durmiente) [39].

3.8. Casas de dispositivos para WSN

A pesar que las redes de sensores son una tecnología reciente, existen varios fabricantes que se dedican al desarrollo de estos dispositivos, y entre los más importantes se encuentran:

3.8.1. Crossbow

La tecnología desarrollada por Crossbow ha estado a la vanguardia de la tecnología de sensores inteligentes durante más de una década desde que

fue fundada en 1995, y ha enviado cientos de miles de sensores inteligentes a más de 4000 clientes a lo largo del mundo. Hoy, Crossbow es el líder en cuanto a tecnología de sensores inalámbricos.



<http://www.xbow.com>

Figura 16. Logotipo de Crossbow

Especializada en el mundo de los sensores, es una empresa que desarrolla plataformas hardware y software que dan soluciones para las redes de sensores inalámbricos. Entre sus productos encontramos las plataformas Mica, Mica2, Micaz, Mica2dot, telos y telosb. Dispone también de gran cantidad de módulos Gateway y placas sensoras.

3.8.2. Shockfish s.a.

Empresa suiza que desarrolla TinyNode pensando en aplicaciones industriales. La misión de esta empresa es hacer de puente entre la investigación académica y el mundo laboral de la industrial en el entorno de redes de sensores inalámbricos.



<http://www.schockfish.com>

Figura 17. Logotipo de Schockfish

3.8.3. Sentilla

Otra de las empresas dedicadas a las redes de sensores inalámbricos, también llamada anteriormente Mote IV. Es la encargada de los motes Tmote Sky, diseñados también por la Universidad de Berkeley y preparados para ser usados por TinyOS. Fue Joseph Polastre, antiguo

doctorando quien formó la compañía Mote IV. Ha desarrollado la plataforma Tmote Sky y Tmote Invent.



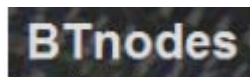
<http://www.sentilla.com/>

Figura 18. Logotipo de Sentilla

Algunas de las firmas de analistas y medios de tecnología del mundo han reconocido a Sentilla por su innovación, valor y liderazgo. La AlwaysOn seleccionó a Sentilla como uno de los ganadores de la Going Global 200 in 2011. La inclusión en el Global 200 de GoingGreen significa el liderazgo entre sus compañeros y enfoques innovadores y tecnologías que pueden perturbar los mercados existentes y operadores ya existentes.

3.8.4. BTnode

Los módulos fabricados por BTnode han sido desarrollados por el ETH Zurich, conjuntamente por el Computer Engineering and Networks Laboratory (TIK) y el Research Group for Distributed Systems.



<http://www.btnode.ethz.ch/>

Figura 19. Logotipo de BTnodes

3.8.5. Sun

Sun SPOT (Sun Small Programmable Object Technology) es un mote para WSN desarrollado por Sun Microsystems. El aparato está construido bajo la normativa estándar IEEE 802.15.4. Al contrario de otros nodos inalámbricos, el Sun SPOT está construido bajo la máquina virtual Java Squawk.



<http://www.sunspotworld.com/>

Figura 20. Logotipo de Sun microsystems

3.8.6. Ember

Ember es uno de los promotores de la Zigbee Alliance y las soluciones propuestas por esta empresa cumplen la capa física según el estándar IEEE 802.15.4.

La tecnología Ember basada en Zigbee es la adecuada para aplicaciones de redes de sensores escalables que requieran una implementación en malla de bajo consumo como automatizaciones en edificios, entre otras.

4. APLICACIÓN DE WSN EN EL ÁMBITO DE LA MEDICINA

4.1. Introducción

En el ámbito de la salud, las redes de sensores pueden llevar a cabo diferentes acciones que monitoreen pacientes, diagnostiquen enfermedades, administren la medicina o monitoreen el movimiento de los pacientes en los hospitales.

El uso de estas redes de sensores inteligentes en el ámbito de la monitorización de la salud reduce considerablemente el número de hospitalizaciones y visitas médicas y con ello los costes anuales del cuidado de la salud en todo el mundo.

En este capítulo se presentará una visión general de la aplicación de las WSN en el ámbito de la medicina, también se describirá detalladamente algunas aplicaciones desarrolladas en los últimos tiempos.

4.2. Visión general de la aplicación de WSN en la medicina

Las aplicaciones médicas de las redes de sensores inalámbricos abarcan hoy en día diferentes áreas de la salud, como por ejemplo, monitorización de la frecuencia cardiaca, presión arterial, medidas de la temperatura corporal, medida de los niveles de glucosa, entre otros.

Una de las aplicaciones que está cobrando una gran relevancia es la monitorización continuada de la salud en el caso de personas mayores: Los médicos quieren ser capaces de monitorizar más de cerca los posibles cambios que sucedan en el estado de salud de sus pacientes pero sin que estos tengan que acudir a la consulta. Como resultado de esta demanda, se precisan dispositivos capaces de realizar una monitorización precisa, continua, remota y transparente del paciente. Los sensores inalámbricos pueden cumplir estos requerimientos, de ahí las recientes investigaciones en la creación de sensores inteligentes inalámbricos para la monitorización de variables fisiológicas.

Actualmente el tratamiento de la diabetes pasa por la diaria monitorización de los niveles de glucosa en sangre del paciente. Para ello, se usan lancetas de forma que mediante una punción se obtenga la cantidad de sangre necesaria para realizar el análisis. Este sistema presenta una serie de inconvenientes ya que la punción continuada varias veces al día, durante años, puede llegar a dañar la piel e incluso los vasos sanguíneos de la zona. Mediante la implantación de sensores inalámbricos inteligentes se podrían realizar mediciones continuas sin necesidad de que el paciente sienta dolor alguno y dichas mediciones serían transmitidas a un receptor externo. De esta forma se podría llevar un control aún más exhaustivo de los niveles de glucosa alertando con mayor rapidez al usuario de las posibles fluctuaciones en los niveles que se produjesen. La implementación física del detector de glucosa puede observarse en la siguiente figura:

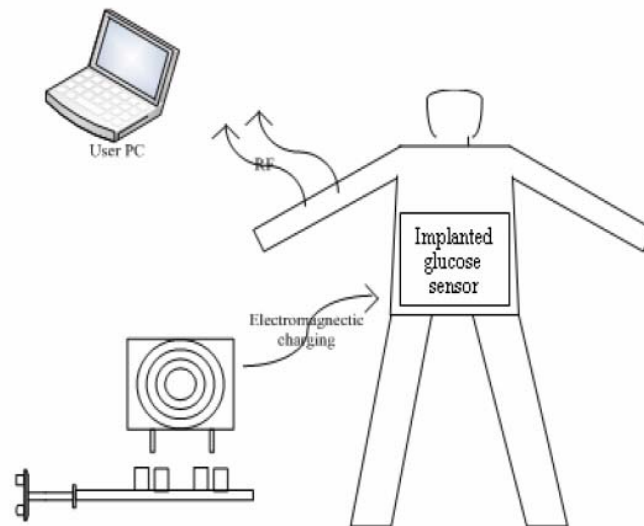


Figura 24. Implementación física para la monitorización de los niveles de glucosa.

El sensor para la monitorización de los niveles de glucosa, es un sensor subcutáneo que se coloca en la piel del paciente. Su funcionamiento se basa en las características ópticas de la glucosa en el espectro infrarrojo [40].

Otra de las aplicaciones muy comunes en el campo de la medicina son las pulsioximetrías, ya que permiten la monitorización no invasiva de los niveles de oxígeno transportado por la hemoglobina en el interior de los vasos sanguíneos. Se utilizan tanto para realizar una evaluación inicial de los pacientes con alguna patología respiratoria, como para un seguimiento continuo de los pacientes inestables por su situación respiratorio y/o hemodinámica.

Este parámetro vital se sitúa prácticamente al nivel del resto de constantes vitales como la presión sanguínea, la frecuencia cardíaca, la frecuencia respiratoria y la temperatura. En [41] se aborda el desarrollo de un oxímetro inalámbrico que entre otras cosas permite mayor libertad de movimiento.

Los sensores inteligentes también se pueden utilizar con el fin de sustituir tareas de sistemas biológicos. Un ejemplo de dicha utilización la podemos observar en [42], donde se describe una aplicación biomédica capaz de

provocar la estimulación eléctrica necesaria para que el sujeto identifique la presencia de objetos del entorno.

El sistema se basa en un chip de prótesis de retina. Este chip está formado por 100 micro sensores, construido e implementado en el ojo humano. De esta manera, el paciente cuya visión se limita o se nubla puede adquirir un nivel de percepción que le permita realizar sus actividades diarias sin problema alguno.

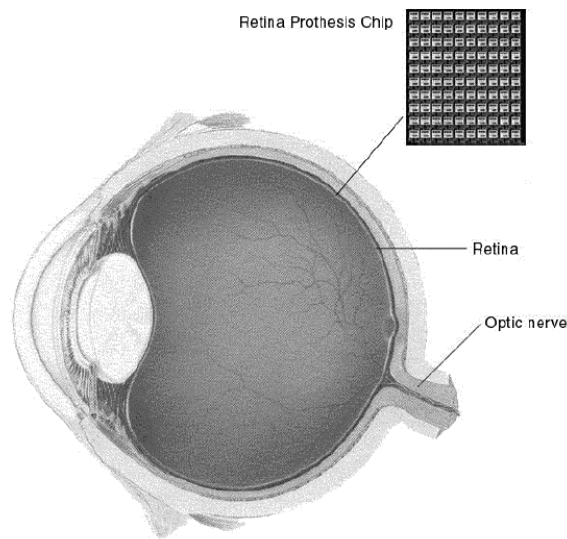


Figura 25. Localización del sensor en el ojo.

Otro de los ámbitos que merecen especial atención es la detección precoz de cáncer. Aunque se están llevando a cabo grandes avances en la lucha contra el cáncer, sigue siendo necesaria una detección temprana de la enfermedad para obtener resultados favorables en su cura. Los sensores inalámbricos inteligentes pueden jugar un papel primordial en la detección temprana de la enfermedad.

Por ejemplo, la imagen posterior presenta un esquemático de un sensor inalámbrico de onda acústica (SAW) para la detección precoz del cáncer [43]. Dicho sensor incorpora una biocapa de anticuerpos receptores de proteínas de células cancerosas, de forma que al detectar una variación de la densidad en la superficie biológica del sensor se detecte la presencia de células cancerosas.

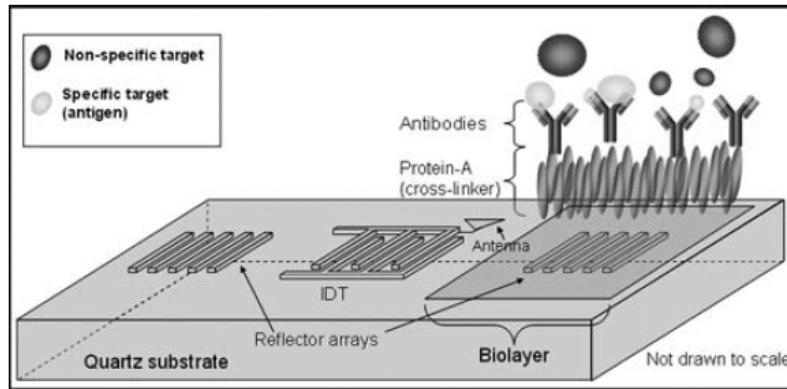


Figura 26. Sensor para la detección precoz del cáncer.

4.3.Descripción detallada de la aplicación de WSN en el ámbito médico

En esta sección se describirá detalladamente la aplicación de las redes de sensores inalámbricos en el área médica para medir dos importantes signos vitales del ser humano: la frecuencia cardíaca y la temperatura corporal; así también se presentará una aplicación enfocado a la monitorización domiciliaria de pacientes con enfermedad de Parkinson.

4.3.1. Red inalámbrica para vigilancia de la salud : Frecuencia Cardíaca y Sensor de temperatura

Otro de los signos vitales que requiere vital atención en el cuidado de la salud de las personas es la frecuencia cardíaca y la temperatura corporal, es por ello que un equipo de investigadores desarrolló un sistema para medir la frecuencia cardíaca y la temperatura del cuerpo. A continuación se presenta un sistema para medir estos dos signos vitales basados en sensores inalámbricos [44].

4.3.1.1. Introducción

El trabajo de investigación que realizó un grupo de investigadores para medir la frecuencia cardíaca y temperatura corporal aporta nuevos caminos a los proveedores de cuidado de salud y a sus pacientes en el acceso y uso de la información.

Se trata de aprovechar el potencial de la tecnología de la información para mejorar la calidad, seguridad, y eficiencia en los cuidados de la salud.

En la salud doméstica, el uso de tecnologías permitirá a los pacientes monitorizar sus propios signos vitales desde casa y comunicar los resultados a un profesional del hospital inalámbricamente, que podría aumentar la capacidad de enfrentar un problema antes de que un paciente requiera cuidados serios

En general, IT permitirá a los proveedores del cuidado de la salud, recoger, almacenar, recobrar y transferir información electrónicamente, ya que en el campo de la salud humana, recoger datos en tiempo real, es vital.

Así, la capacidad para monitorizar remotamente los signos vitales en tiempo real supone un área de creciente interés [45]. La portabilidad, facilidad de despliegue / escalabilidad, capacidad de medir en tiempo real, reconfiguración y auto organización son algunas de las ventajas de usar una red de sensor inalámbrico en un sistema de salud.

Por otro lado, los dispositivos inalámbricos utilizando algunas de las tecnologías de la comunicación existentes, tienen algunas limitaciones. Algunas de ellas son caras y no energéticamente eficientes. Otras, como Bluetooth limita el número de nodos que pueden comunicarse entre sí en un tiempo dado [46].

De esta manera los sensores inalámbricos se convierte en un elemento atractivo para el presente sistema de monitoreo ya que no necesitan conexión de un gran ancho de banda como WiFi. En su lugar, necesitan baja latencia y muy bajo consumo de energía para una larga vida de las baterías.

Por otro parte la tecnología ZigBee es otra buena alternativa, por que funciona con baja energía y es capaz de conectar un gran número de dispositivos a una única red. Además, usa el ancho de banda de frecuencia de 2.4GHz y permite a una aplicación inalámbrica usar protocolos de comunicación estándar basados en el estándar IEEE 802.15.4 para redes inalámbricas de área personal [47]. También ofrece

una comunicación de baja latencia entre dispositivos sin que requiera sincronización de los retrasos en la red.

De esta manera se combinó la tecnología Zigbee y el microcontrolador Arduino.

También se llevó a cabo un experimento en un grupo de 50 voluntarios para medir el ritmo cardíaco y la temperatura de la piel del cuerpo.

Además se aplicó la ecuación Burton [48] para obtener la temperatura corporal media y se concluyó que la ecuación daba una buena estimación de la temperatura corporal media.

A continuación se presenta el sistema inalámbrico y se describe algunos detalles de la frecuencia cardíaca y los sensores de la temperatura corporal.

4.3.1.2. Descripción del sistema

Una visión conceptual del sistema se muestra en la Figura.21. El núcleo del sistema consiste en un hardware y software del micro controlador Arduino, un sensor de temperatura, un sensor de frecuencia cardíaca, un radio XBee y un protocolo de sistema de comunicación inalámbrica. El sensor se envuelve alrededor de la muñeca.

Se muestra la frecuencia cardíaca y la temperatura corporal media en la pantalla LCD, se encripta los datos y los transmite a un PC remoto usando la red XBee. El coordinador es conectado a un PC remoto que ejecuta un programa para monitorear y procesar los datos que llegan.

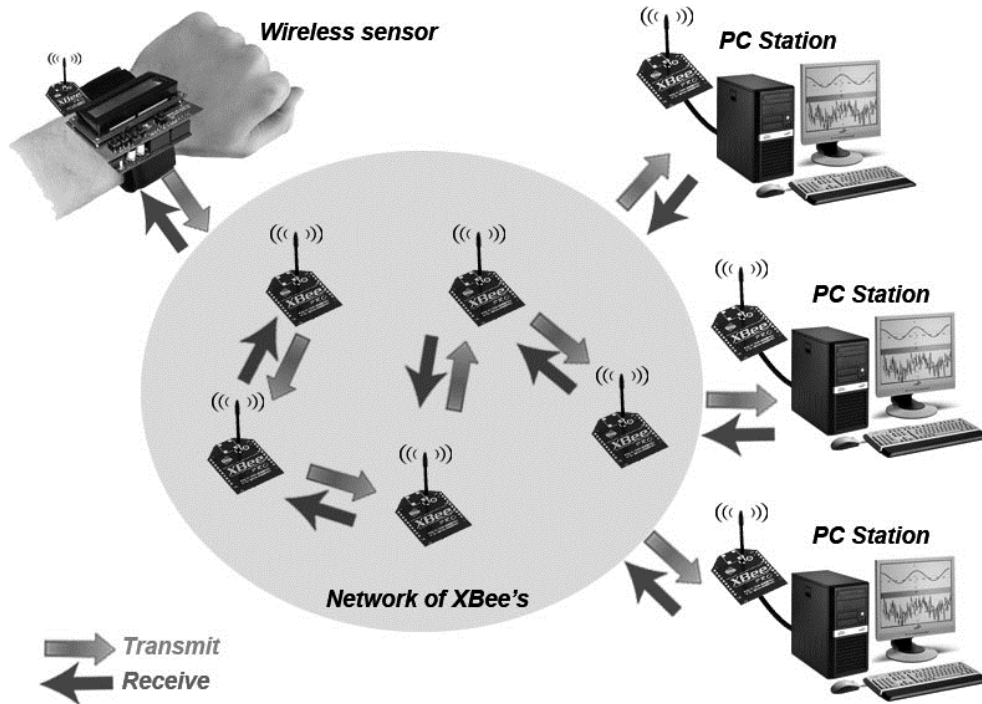


Figura 24. Vista Conceptual del sistema

A. El hardware del micro controlador Arduino

El Arduino es un micro controlador de placa única, lo cual permite que los procesos electrónicos en proyectos multidisciplinarios sean más accesibles [49]. El hardware consiste en una simple tarjeta Arduino con un procesador de 8 bits de Atmel AVR y soporte de entradas y salidas a bordo. Los conectores del Arduino permiten que la placa del CPU se conecte a una amplia variedad de módulos intercambiables que se pueden añadir, conocidos como Shields (Escudos). Shield XBee permite que un módulo XBee se conecte a la placa de Arduino.



Figura 25. Arduino, XBee shield and modulo XBee

B. El software del micro controlador Arduino

El IDE de Arduino es una aplicación multiplataforma escrita en Java. Se deriva del IDE para el procesamiento de lenguaje de programación y el proyecto Wiring [49]. El software de Arduino consiste en un compilador de lenguaje de programación estándar y el cargador de arranque que se ejecuta en la placa. El hardware Arduino puede ser programado usando un lenguaje de programación específico el cual es similar a C++. Esto hace la programación del microcontrolador mucho más fácil. Se puede transmitir los datos escribiéndolos en un puerto serial, usando un simple comando de comunicación serial, que se necesita para la sincronización, inicialización y/o usar interruptores. El software Arduino es gratis y de código abierto.

C. Radio Xbee

El ZNet XBee-PRO 2.5 (antes conocido como Serie 2/PRO y diseñado para operar dentro del protocolo ZigBee) atiende las necesidades únicas de bajo costo y bajo consumo de energía de redes de sensores inalámbricos. Los módulos requieren un mínimo de energía, proporcionar una entrega confiable de datos, operar en la banda de frecuencia de 2,4 GHz y ser compatibles con los adaptadores de entrada/salida analógico / digital

Las interfaces de módulo XBee con un dispositivo host a través de un puerto serial asíncrono de nivel lógico [50]. La Tecnología ZigBee define tres distintos tipos de dispositivos: un Coordinador, un router y un dispositivo final. El XBee Shield permite una placa Arduino para comunicarse de forma inalámbrica utilizando ZigBee. El módulo puede comunicar hasta 100 metros en interiores o 300 pies al aire libre (con line-of-sight) [49].

D. Sensor de temperatura TMP36

Un sensor de temperatura analógico utiliza una técnica de estado sólido para determinar la temperatura. Estos dispositivos no utilizan mercurio o resistencias sensibles a temperaturas. En cambio, a medida que aumenta la temperatura, el voltaje a través del diodo aumenta a una velocidad conocida. Se trata de la caída de tensión entre la base y el emisor de un

transistor. El dispositivo es capaz de generar una señal analógica que es directamente proporcional a la temperatura

En comparación con LM34/TMP34 (salida de Fahrenheit) y LM35/TMP35 (salida de Celsius), el sensor de temperatura de TMP36 tiene una gama más amplia de -40°C a 150°C . No requiere un voltaje negativo para leer temperaturas bajo cero. Según la hoja de datos de TMP36, el sensor funciona dentro de un rango de baja tensión de 2.7V a 5.5V y calibrado directamente en grados $^{\circ}\text{C}$. Tiene un factor de escala de $10\text{mV} / ^{\circ}\text{C}$ con una precisión de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ y tiene propiedades que experimenta calentamiento espontáneo bajas. A diferencia de los sensores de fotocélula, la TMP36 no actúa como una resistencia. Esto significa que solo hay una manera para leer el valor de la temperatura del sensor, conectándolo directamente en una entrada análoga del convertidor analógico/digital del micro controlador (ADC).

El sensor de temperatura tiene que ser calibrado antes de su uso. Aplicando las ecuaciones siguientes para un sensor de temperatura TMP36 conectado a la fuente de alimentación de 5V daría una lectura analógica de 10-bit en un rango entre 0 a 5000milli-voltios y convertiría la lectura en un $^{\circ}\text{C}$:

$$\text{SensorOutput}_{\text{mVolts}} = \text{ADC}_{\text{readings}} * (5000/1024)$$

$$T(^{\circ}\text{C}) = (\text{SensorOutput}_{\text{mVolts}} - 500) / 10$$

Las temperaturas de diferentes tipos de objetos son examinadas por un termómetro digital (Fluke 51 K/J) y el sensor de temperatura TMP36 para hacer segura la calibración da una estimación aceptable.

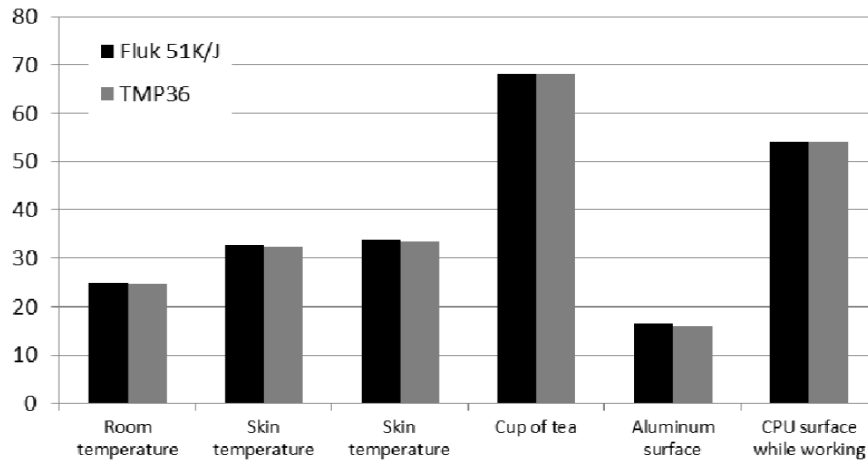


Figura 26. Comparaciones de lecturas de temperatura después de la calibración

La temperatura media corporal se define como el promedio ponderado en masa de las temperaturas de los tejidos en todo el cuerpo [48]. La distribución del calor del cuerpo puede ser modelado como dos compartimientos térmicos, es decir, el núcleo (tronco y la cabeza) y los tejidos periféricos (las extremidades) [48]. La temperatura central es fácil de medir y las temperaturas son relativamente homogéneas en todo el tronco y la cabeza. Por lo tanto, es fácil determinar una temperatura promedio del compartimiento térmico del núcleo [48].

Las temperaturas del tejido periférico son diversas y ampliamente dependientes de la región, de las características medioambientales y vasomotora termorreguladora [48]. Es difícil de medir pero se logra insertando un número suficiente de termopares de aguja, combinado con complicados cálculos [48]. Según la ecuación de Burton (1935), la temperatura media del cuerpo (MBT) puede ser calculado como sigue:

$$MBT = \alpha * T_{core} + (1 - \alpha) * T_{skin}$$

La forma general de la ecuación se basa en la lógica que los tejidos fundamentales son relativamente homogéneos mientras que la temperatura del tejido en la periférica disminuye parabólicamente desde la temperatura

del núcleo hasta la temperatura de la piel del cuerpo [48]. El valor de α (coeficiente que describe la contribución de la temperatura a la temperatura corporal media) se calcula midiendo simultáneamente el cambio en el contenido del calor del cuerpo, la temperatura central y la temperatura media de la piel. Burton estima el valor del coeficiente α como 0,64, dando así la ecuación

$$MBT = 0.64 * T_{core} + 0.36 * T_{skin}$$

Un enfoque similar ha sido utilizado en diferentes estudios, resultando en una estimación muy cerca para el valor de α . Hardy and DuBois [10] estiman $\alpha = 0.7$ para un entorno neutro, Stolwijk y Hardy estiman [11] $\alpha = 0.7$ para un entorno caliente y Snellen [51] estiman $\alpha \approx 0.8$ durante trabajo muscular en un entorno caluroso.

Para poder utilizar la ecuación de Burton con el propósito de esta investigación, se realizó un experimento con un grupo de 50 voluntarios. Se midió la temperatura de la piel de su cuerpo con sensor de temperatura de TMP36 y su temperatura interna con termómetro digital Omron MC-246. Los resultados se muestran en la figura 24.

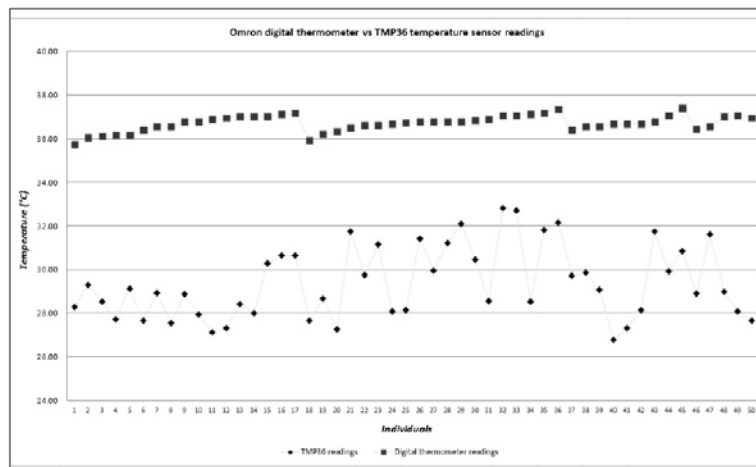


Figure 27: Lecturas del termómetro de temperatura TMP36 vs Omron

- Lectura del termómetro digital
- ◆ Lectura de TMP36

La diferencia entre lecturas fue calculada en cada punto:

Mínimo:	4.24 °C
Máximo:	9.88 °C
Mediano:	7.50 °C
Promedio:	7.31 °C
Desviación Standard	1.57 °C

Luego la ecuación de Burton fue aplicado a la lectura de datos por el sensor de temperatura TMP36.

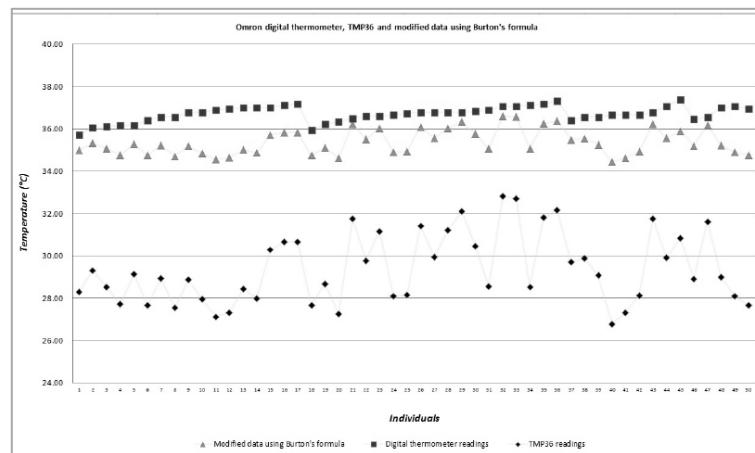


Figura 28. Datos de TMP36 y datos modificados vs termómetro Omron

- ▲ Datos modificados usando la formula de Burton
- Lectura del termómetro digital
- ◆ Lectura de TMP36

Mínimo:	0.27 °C
Máximo:	2.33 °C
Mediano:	1.30 °C
Promedio:	1.33 °C
Desviación Standard	0.58 °C

El análisis estadístico de los datos se muestra en la Tabla 4:

	Variable 1	Variable 2
Mean	7.314720891	1.334855076
Variance	2.451540237	0.331871661
Observations	50	50
Pearson Correlation	0.917745047	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	49	
t Stat	39.81612614	
P(T<=t) one-tail	2.77309E-39	
t Critical one-tail	1.676550893	
P(T<=t) two-tail	5.54617E-39	
t Critical two-tail	2.009575199	

Tabla 4: t-test – paired two sample for means

El valor p de la prueba indica que hay una diferencia significativa entre las medias de los dos grupos a intervalo de confianza del 95% ($\alpha = 0,05$). Por lo tanto, la ecuación de Burton da una buena estimación de la temperatura corporal media en términos de núcleo y la temperatura corporal de la piel.

E. Principio de oximetría del pulso

El principio de oximetría del pulso está basado en las características de la hemoglobina oxigenada y desoxigenada de absorción de luz roja e infrarroja. La hemoglobina oxigenada absorbe más luz infrarroja y permite que pase más luz roja, a través de la hemoglobina desoxigenada que absorbe más luz roja y permite que pase más luz infrarroja [52]. La luz roja está en la longitud de onda de 600-750nm y la luz infrarroja está en la banda de luz de longitud de onda de 850-1000nm.

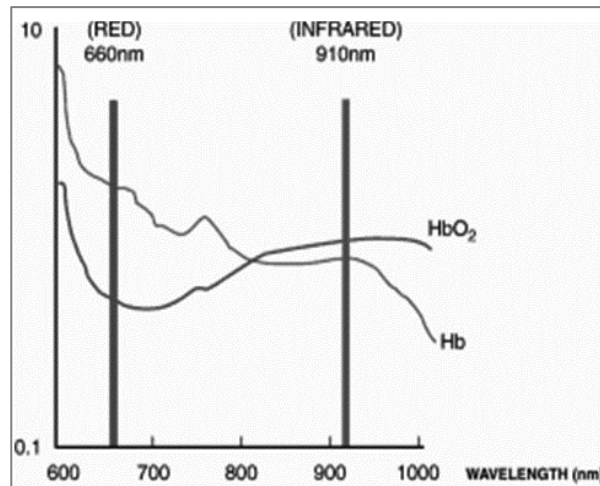


Figura 29: Longitud de onda de infrarrojos y la luz roja

El sensor de frecuencia cardíaca usa un emisor de luz infrarroja que brilla a través de un lugar traslúcido con buena corriente sanguínea [53]. Tiene un emisor que desprende luz IR. Enfrente del emisor está el detector de fotos o fototransistor que recibe la luz que pasa a través o rebota hacia atrás del lugar de medida. Hay dos métodos para enviar luz a través del punto de medida: transmisión y reflectancia.

En el método de transmisión, el emisor y el detector están uno enfrente del otro con el punto de medida en medio, y la luz puede a continuación pasar a través del punto. En el método de reflectancia, el emisor y el detector están uno al lado del otro en el lugar o punto de medición. La luz rebota de nuevo desde el emisor al detector en todo el punto.

F. Frecuencia cardíaca y configuración del sensor

La **Figura 30**, muestra un diagrama simplificado de la configuración del hardware. Las señales fuera del fototransistor son pasados a través de un filtro de paso alto (High-pass), una fase de amplificación, y luego, un filtro de paso bajo (Low-pass). La señal es finalmente muestreada por el micro controlador.

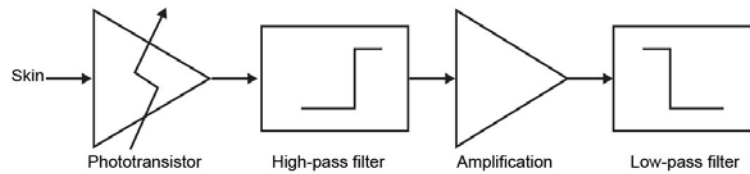


Figura 30: Diagrama simplificado del hardware

Figura 31. En este diagrama se muestra la luz que se emite por el emisor IR, y luego pasa a través del punto de medida y es detectada por el fototransistor. Estos dispositivos operan a 940 nm. Un ADC en un micro controlador permite que se recojan lecturas variables desde el detector. El detector es un transistor NPN y está influenciado por la luz IR que llega.

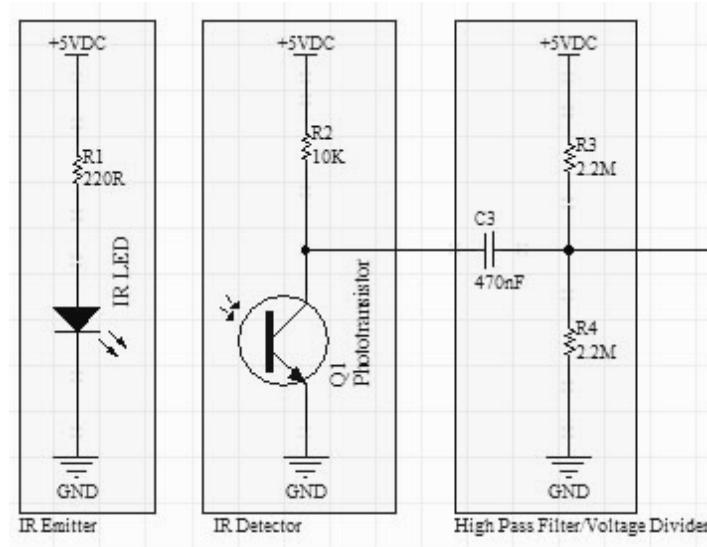


Figura 31: Sensor IR / fototransistor y filtro de paso alto (high-pass)

Figura 32. Las señales filtradas van a un punto de entrada 3 de LM358 y son ampliadas. El LM358 tiene dos internamente compensados. La primera entrada se usa como amplificador y la segunda como comparador.

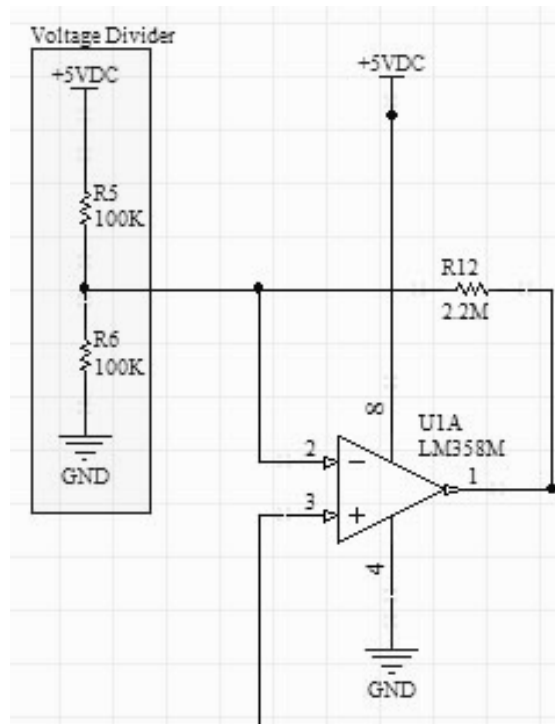


Figura 32. Amplificación de la señal

Figura 33. La salida del op-amp pasa a través de un filtro de bajo paso con una frecuencia de corte de 6.03Hz para retirar las señales de alta frecuencia sobre el umbral.

$$f_{LowPassFilter} = \frac{1}{2\pi R_7 C_4} \approx 6Hz$$

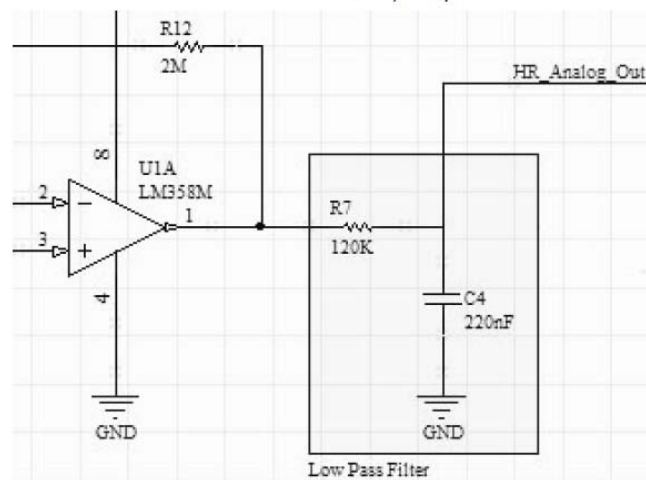


Figura 33. Filtro de paso bajo (Low pass)

Las señales filtradas llevan la información deseada: el latido del corazón o pulso. La salida del punto 1 de LM358 es analógica y lleva un montón de números que indican el nivel de voltaje ampliado detectado por el foto detector.

La histéresis para la mayoría de los circuitos del comparador es la diferencia entre el voltaje de la señal de entrada, que hace que la salida del comparador esté completamente encendida o apagada. Se puede añadir la histéresis a un circuito para reducir la sensibilidad al ruido no a una señal de entrada que se mueve lentamente.

Se puede aumentar una escala de la histéresis del comparador añadiendo un resistor entre la salida y el terminal de entrada PLUS. Esto crea un bucle de retroalimentación. Cuando la salida hace una transición, la retroalimentación cambia el voltaje en la entrada PLUS, lo cual aumenta la diferencia de voltaje entre las entradas PLUS y MINUS.

La Figura 34. Muestra la histéresis en el comparador LM358

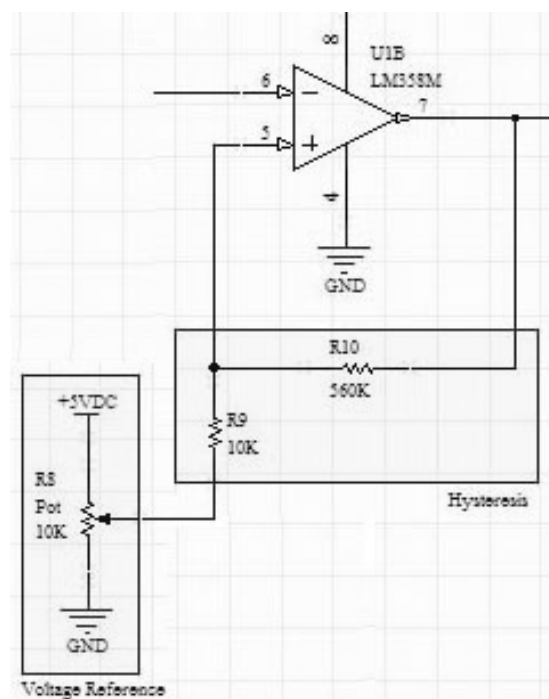


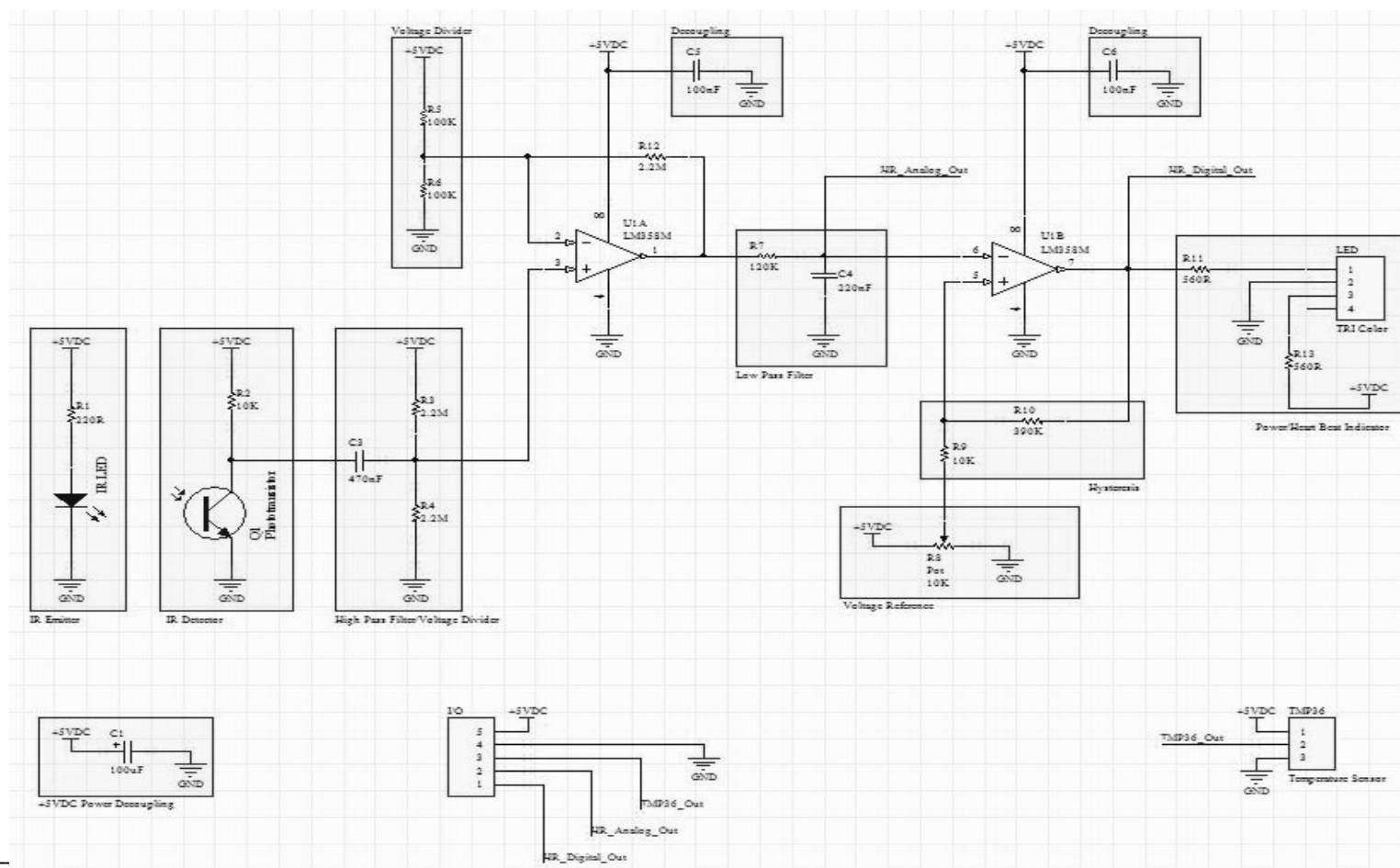
Figura 34: Histéresis y referencia de tensión del umbral

La salida del comparador (pin 7) se usa para conducir un LED indicando un latido. Ello crea una señal digital (alta o baja) y se usará para calcular la velocidad del corazón.

Figura 35. Muestra el diagrama completo del hardware.

La pantalla de cristal líquido (LCD) viene en diferentes formas, colores y tamaños. El Arduino usa la Biblioteca de cristal líquido para comunicar con la pantalla LCD. Un carácter de electrolito 16*2 LCD se conecta al micro controlador para visualizar la velocidad cardíaca y lecturas de temperatura.

Figura 35. Diagrama completo del esquema del hardware



G. Experimentos y pruebas

Se desarrolló un prototipo de sensor para la frecuencia cardiaca. Se desarrollaron un número de experimentos y pruebas incluyendo hardware y software, durante la etapa de desarrollo. Se hizo un ensayo sobre el prototipo en un número de individuos (un grupo de 50 voluntarios). Las figuras 36, 37, 38 y 39 muestran un ejemplo de salida analógica y digital del prototipo:

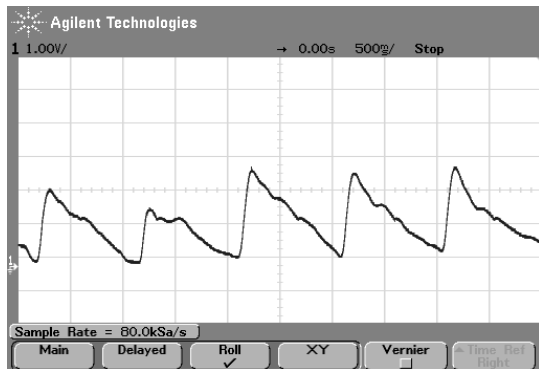


Figura 36. Salida analógica del amplificador operacional

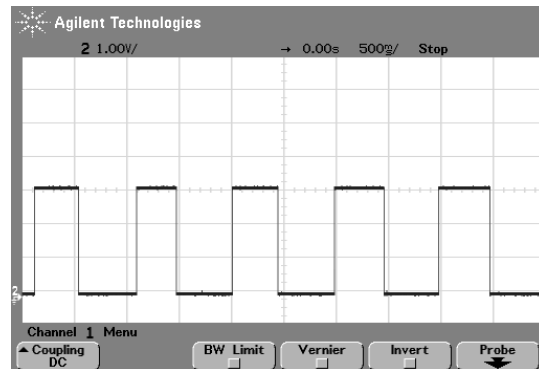


Figure 37: Prueba de la salida digital del comparador

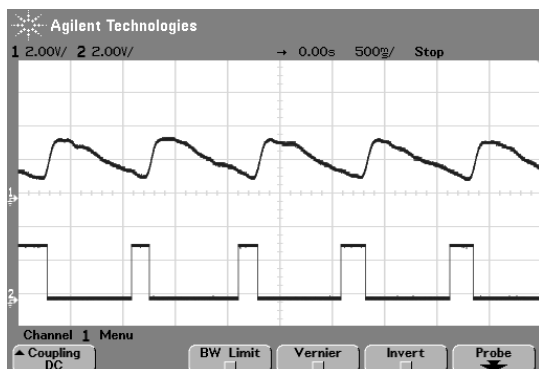


Figura 38: Detección de los latidos

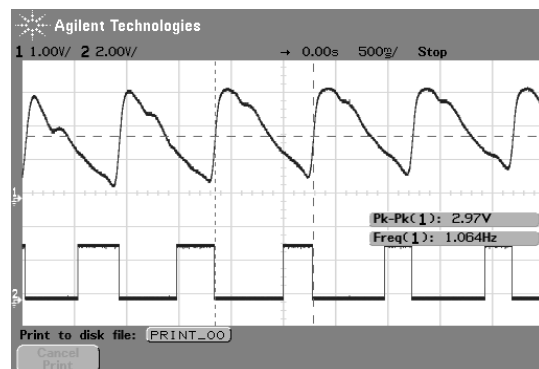


Figura 39: Frecuencia de pulsos ($1.064 \times 60 \sim 64$ latidos por minuto)

Para ahorrar energía la frecuencia de muestreo para IR es de 10 segundos y el módulo XBee irá a modo reposo hasta que se reciba una orden apropiada del coordinador. Se leen dos muestras analógica y digital. Las señales analógicas son entonces transmitidas a un equipo de PC remoto para posteriores análisis y las muestras digitales se usan para calcular el latido del corazón multiplicando el número de pulso detectado por 6 para obtener los latidos por minuto.

H. Comunicación inalámbrica

La frecuencia cardíaca y señal de temperatura obtenida usando el sensor desarrollado por esta investigación, es capaz de ser enviado a un ordenador a través de la comunicación inalámbrica. Por lo tanto, el sistema es capaz de monitorizar el estado de la frecuencia cardíaca y la temperatura corporal.

ZNet 2.5 firmware permite a los routers o dispositivos finales comunicarse con el Coordinador por defecto el cual hace sencilla la comunicación punto a punto [50]. La Serie de datos se envía al router XBee (o dispositivo final) conectado al microcontrolador Arduino y recibido por el Coordinador

El EPROM del Arduino tiene 512 bites de longitud. Puede ser programado usando la biblioteca EPROM de Arduino. El programa en el micro controlador funciona como sigue:

- a. La EPROM Arduino es programado con un único número asignado a cada paciente. Este número actúa como una clave primaria con el fin de almacenar los datos en una base de datos.
- b. Se calcula la temperatura y frecuencia cardíaca
- c. Los valores anteriores se conservan juntos como un único paquete.
- d. El paquete es codificado
- e. Los datos (el paquete) en el puerto serial Arduino es transmitido a la PC remoto.

I. Factores de error en pulso

Si bien el prototipo tiene muchas ventajas, incluyendo la efectividad en el coste, ligereza y facilidad de uso, hay varios factores que pueden causar errores en la medición, los cuales deben ser tomados en cuenta cuando se utiliza el sensor.

1. Si los usuarios tienen algún material especial en su lugar de medición tal como esmalte de uñas o cubierto por material reflectante.
2. El movimiento del cuerpo puede causar muchos ruidos que reducirán la fiabilidad del dispositivo y error en las lecturas.

3. Si el flujo de sangre es bloqueada debido a la presión en brazos o dedos, la medición correcta se hace imposible.
4. El dispositivo puede cancelar los efectos de las luces ambientales. Sin embargo, si la luz se vuelve demasiado fuerte, el dispositivo solo podría cancelar algunos de los efectos y esto podría causar errores.
5. Si los sensores no están adecuadamente colocados en el sitio de medición, se podría detectar una variedad de ruido, dando mediciones imprecisas.

4.3.1.3. Conclusión

Esta investigación se realizó para desarrollar un sistema de monitoreo inalámbrico de salud basado en los sensores que sean capaz de medir dos signos vitales de la salud (la frecuencia cardíaca y la temperatura corporal) y comunicarse con el dispositivo final.

Los experimentos y pruebas realizados un grupo de 50 voluntarios de 18 a 37 años de edad dieron como resultado una medición aceptable de la temperatura media del cuerpo humano y la frecuencia cardíaca.

La investigación llevada a cabo establece las bases para un entorno de monitorización de la salud y de acuerdo a los experimentos y pruebas realizadas se determina que los sensores desarrollados son capaces de leer la temperatura corporal media y la frecuencia cardíaca

Con este sistema prototipo, más características podrían ser añadidas como las funcionalidades para detectar la presión arterial y el nivel de glucosa. Con el desarrollo adicional en la fiabilidad de los nodos sensores, seguridad y análisis de datos, etc. el sistema junto con el software de monitorización remoto tendrá un área de aplicación enorme no sólo en el campo de la salud humana.

En términos del microcontrolador y las placas PCB asociadas, se espera que más estudios se enfoquen a la fabricación de placas más pequeñas y más baratas, reduciendo aún más el peso y tamaño de los sensores.

4.3.2. Aplicación de WSN para la monitorización de pacientes con enfermedad de Parkinson

En esta sección se presenta una aplicación para la monitorización domiciliar de pacientes con enfermedad de Parkinson mediante sensores inalámbricos y una aplicación web [54].

4.3.2.1. Introducción

El manejo clínico de un gran número de condiciones médicas requiere de un amplio control del estado de salud de la persona. La monitorización hospitalaria continua tiene la tendencia que puede conducir a la detección temprana de un problema.

Así, el monitoreo de salud a largo plazo puede mejorar el manejo clínico de varias afecciones que van desde enfermedades cardiopulmonares a trastornos motores.

Hoy en día con todo los avances actuales y los que están en curso en tecnología de sensores, se hace posible imaginar un sistema discreto para el seguimiento o monitorización de la salud humana de forma más continua.

Estos sistemas de sensores son prometedoras herramientas que pueden activar el monitoreo en casa. El monitoreo en casa tiene el potencial de mejorar el nivel de prestación de asistencia sanitaria, lo cual le hace un proceso eficiente y rentable.

Un equipo de investigadores de Estados Unidos se enfocó en el desarrollo de un sistema de monitorización domiciliar de pacientes con enfermedad de Parkinson (PD), el cual es utilizado hoy en día para controlar a dichos pacientes con PD que experimentan fluctuaciones motoras severas.

El monitoreo se consigue utilizando sensores inalámbricos portátiles cuyos datos se transmiten a un centro clínico remoto a través de una aplicación basada en web. La aplicación desarrollada muestra que los sensores portátiles combinados con una aplicación basada en web proporcionan

información cuantitativa confiable que puede ser utilizada para la toma de decisiones clínicas.

Los resultados de los análisis de los datos registrados usando tal sistema de monitoreo domiciliario muestran que el sistema puede ser empleado para controlar eficazmente la gravedad de las fluctuaciones motoras en pacientes con PD. Estos resultados constituyen un buen fundamento para la viabilidad de la monitorización domiciliaria de los pacientes con etapa tardía de PD, que se sabe que requieren valoraciones periódicas de sus medicamentos.

Para un mayor conocimiento de la aplicación, a continuación se describe.

4.3.2.2. Enfermedad de Parkinson

A. Panorama general

La enfermedad de Parkinson también denominada Parkinsonismo idiopático o parálisis agitante, es un trastorno degenerativo que implica una pérdida gradual de la función de las neuronas en el cerebro, es decir, que se trata de un trastorno neurodegenerativo, que se desarrolla a largo plazo y presenta síntomas leves que avanzan a medida que pasan los años hasta convertirse en síntomas más graves. Por lo tanto, la pérdida de neuronas lleva a un declive de ciertos aspectos de la función corporal, concretamente del control de los movimientos. Los rasgos característicos motoras son temblor en reposo, bradicinesia (lentitud anormal del movimiento), rigidez (parálisis), y el deterioro del equilibrio postural.

La PD es el desorden más común del movimiento, que afecta a alrededor del 3% de la población mayor de 65 años y más de 500.000 residentes de Estados Unidos. La terapia actual de la PD se basa principalmente en el aumento o la sustitución de la dopamina, usando la levodopa precursor biosintético u otras drogas que activan los receptores de dopamina.

B. Monitorización de fluctuaciones motoras

Actualmente herramientas disponibles para la monitorización de fluctuaciones motoras son muy limitadas. En la práctica clínica, la información sobre las fluctuaciones motoras se obtiene generalmente preguntando al paciente a recordar el número de horas de ON y OFF TIME que han experimentado últimamente. "ON TIME" se usa para referirse a los períodos cuando los medicamentos son efectivos para atenuar los síntomas.

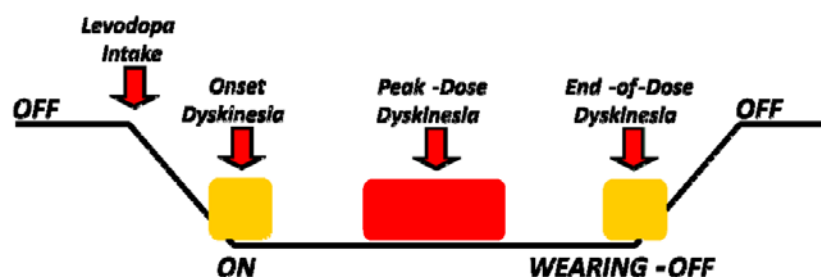


Figura 40. Ciclo de fluctuación motora de la enfermedad del Parkinson

"OFF time" se utiliza para referirse a los períodos cuando los síntomas están presentes.

En este estudio se exploró, el uso de sensores portátiles para capturar características de movimiento, que están asociados con cambios en la gravedad de las fluctuaciones motoras que se producen durante los intervalos entre la dosis de la medicación.

El objetivo fue identificar las características del movimiento asociados con fluctuaciones motoras en pacientes con enfermedad de Parkinson basándose en sensores portátiles [55]. Se utilizó 8 acelerómetros en los miembros superiores e inferiores para monitorizar a los pacientes mientras realizaban una serie de tareas motoras estandarizados por la Escala Unificada de la Enfermedad de Parkinson (UPDRS). También se realizó una grabación de vídeo de los pacientes, el cual fue evaluado más tarde por un experto médico clínico para asignar las puntuaciones

clínicas. Así también se investigó los costes computacionales asociados con las características extraídas de los nodos sensores.

4.3.2.3. Requisitos del sistema

Los requisitos del sistema variarán según la naturaleza de la aplicación en cuestión. Los requisitos de hardware para un sistema de monitorización en una casa típica, se puede dividir en tres categorías: red de sensores, la seguridad de datos, y la interacción médico-paciente.

A. Red de sensores

Como se sabe, una red típica de sensores inalámbricos de cuerpo (BSN) se compone de varios sensores en miniatura con recursos limitados, tales como el almacenamiento, ancho de banda, potencia de procesamiento y capacidad de la batería.

Como se muestra en la Figura. 38, los sensores transmiten datos a una estación base, tales como un ordenador portátil (laptop), un teléfono móvil, el cual actúa como Gateway de información.

B. Seguridad de los Datos

Asegurar los datos de una BSN es de suma importancia ya que los datos viajan desde el paciente hasta el médico clínico. Se trata de garantizar que se ha establecido un canal de comunicación seguro para la transferencia de datos que cumple con las regulaciones establecidas para la privacidad de los pacientes y la seguridad de los datos.

C. Interacción Médico-Paciente

La Interacción entre los pacientes y los médicos es fundamental para el éxito de la aplicación de monitorización domiciliaria. Los requisitos podrían variar desde una simple videoconferencia de acceso en tiempo real a los datos del sensor.

Algunas aplicaciones, como la detección de ataques epilépticos o detección de caída, requieren de un análisis de datos en tiempo real, y la pronta intervención de un médico.

Los procedimientos de procesamiento de los datos apropiados deben estar disponibles para derivar la información clínicamente relevante a partir del análisis de los datos del sensor portátil.

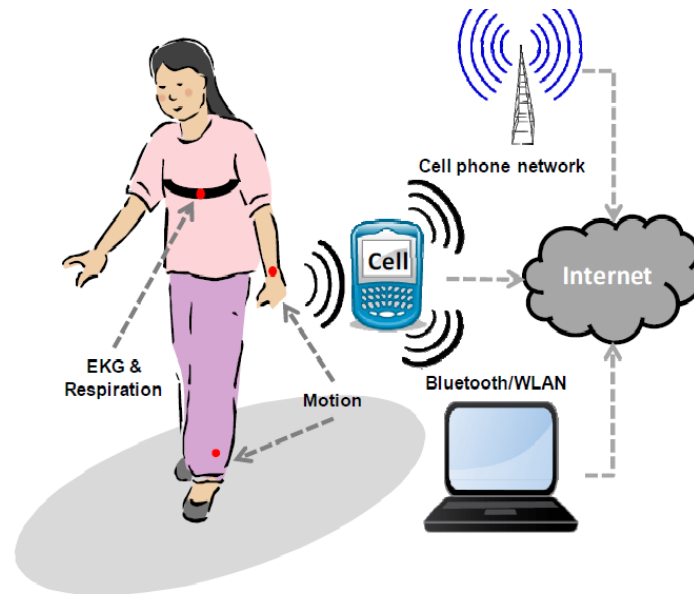


Figura 41. Escenario general de monitorización domiciliar. Sensores portátiles registran datos que es enviado por Internet través de las pasarelas como: teléfonos móviles, PDAs, y ordenadores personales.

4.3.2.4. Diseño del sistema e implementación

El sistema se basa en una arquitectura que permite el control en casa de los pacientes con enfermedad del Parkinson, además de otras condiciones médicas.

Se ha aprovechado la plataforma Mercury BSN [56], trabajo anterior realizado por el equipo de investigación.

La interacción entre paciente y médico se realiza a través de una aplicación web que proporciona acceso a los datos del sensor y capacidad de videoconferencia. Finalmente, se han desarrollado algoritmos para la aplicación específica que nos ocupa, esto es, la monitorización de la gravedad de las fluctuaciones motoras en pacientes con PD en etapa tardía. Los algoritmos estiman los resultados que coinciden con aquellos obtenidos a través de la UPDRS.

A. Arquitectura del sistema

En la Figura 39 se muestra el sistema de monitorización domiciliar implementado, que incluye servicios de software que se ejecutan en tres

niveles: Servidor central del portal, hosts del paciente y hosts del médico clínico.

Para garantizar tanto la seguridad de los datos y la alta disponibilidad del servicio de monitorización remota de salud, un servidor central del portal proporciona una ubicación segura y confiable para coordinar la recogida de los datos en tiempo real y servicios de video.

El servidor central del portal reside en un centro de datos seguro del proveedor de asistencia sanitaria y permite el acceso sólo sobre servicios bien encriptados.

La implementación usa SSL y SSH para establecer canales seguros para todas las transferencias de datos. Ya que tanto el paciente y el médico dependen de la base de datos del servidor web, del servicio de videoconferencia en directo, el servicio de reenvío de datos (que realiza la toma del registro de datos del entorno) y las sesiones interactivas activas.

El host del paciente, normalmente un ordenador portátil, ejecuta la plataforma Mercury BSN. La plataforma recoge datos de movimiento y continuamente carga los datos del sensor a la base de datos del servidor central del portal.

El host del médico clínico, que puede estar en la oficina del médico o en su hogar, sólo requiere un navegador web para tener acceso a los servicios.

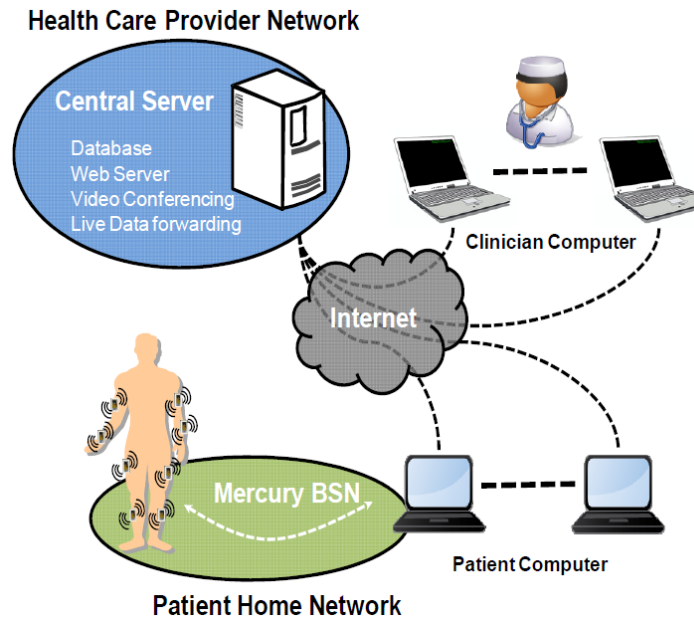


Figura 42. Una visión general de la arquitectura del sistema de monitorización propuesto

B. Plataforma Mercury

La plataforma inalámbrica de BSN desarrollado por el equipo de investigación, se llama Mercury. Se compone de una serie de pequeños sensores inalámbricos portátiles basados en la plataforma de sensor SHIMMER y ha sido diseñado para apoyar la recopilación de datos longitudinales a largo plazo de pacientes en el hospital y hogar, y superar los retos fundamentales de la vida útil de la batería y datos de alta fidelidad para estudios a largo plazo, donde los pacientes usen sensores continuamente de 12 a 18 horas al día.

Mercury proporciona una interfaz de programación de alto nivel que permite a un investigador clínico construir rápidamente diferentes directivas para el manejo de recopilación de datos.

C. Aplicación web y análisis de datos

Además de recopilar, almacenar y proporcionar en forma segura datos de movimiento del paciente, el sistema también admite la capacidad de comunicación de vídeo en directo entre los médicos y pacientes.

Mediante la función de interacción del vídeo, los médicos pueden realizar remotamente sesiones de recopilación de datos, que

normalmente se realizan en un entorno hospitalario. Este servicio de interacción video es proporcionado por un servidor de videoconferencia de Red5.

Para proporcionar una interfaz fácil de usar, se implementó una multiplataforma de aplicación web, MercuryLive (que se muestra en la Figura 43), que funciona como un Plug-in de Flash en cualquier navegador moderno.

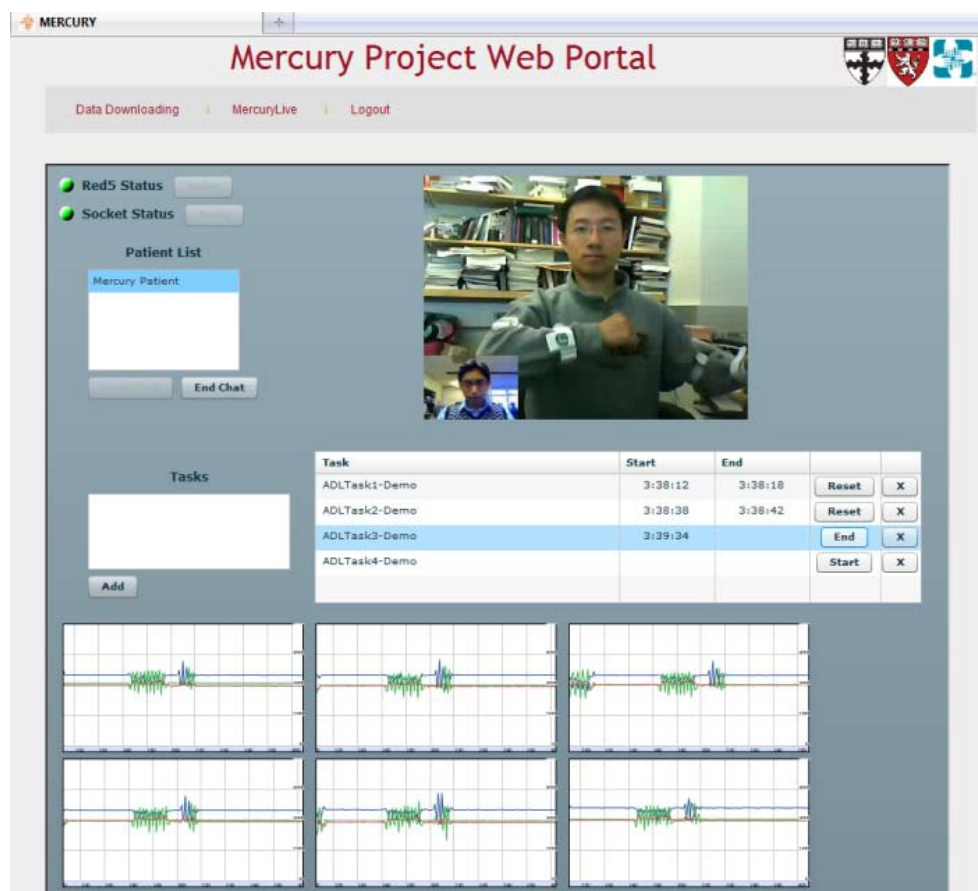


Figura 43. Captura de pantalla de la aplicación web MercuryLive.

Esta aplicación contiene una interfaz gráfica de usuario para visualizar en vivo señales de movimiento, junto con la sesión de vídeo que permite a los médicos ver y anotar los datos durante cada sesión remota de recopilación de datos monitoreados. Usando MercuryLive, los médicos también pueden descargar datos a largo plazo para personalizar rigurosos análisis de datos.

Los datos recopilados usando el sistema descrito anteriormente son luego procesados para obtener estimaciones de puntuaciones UPDRS. Los datos del Acelerómetro recopilados usando la plataforma de Mercury son segmentados, filtrados y procesados para obtener como resultado funciones asociadas con características de movimiento de interés (por ejemplo, el componente periódico de 4 a 7 Hz asociado con temblor) [55].

Un clasificador de la máquina de Vector de apoyo (SVM) fue entrenado y optimizado para la clasificación de puntuaciones clínicas de discinesia tardía, bradiquinesia y temblor. El clasificador se entrenó utilizando un conjunto de datos grabados mientras los sujetos realizaban tareas motoras que formaban parte de la evaluación de UPDRS.

En otras palabras, el análisis de datos del sensor portátil se recogió usando la plataforma de monitoreo descrita anteriormente, que permite conseguir el análisis automático de datos para realizar de forma remota una evaluación UPDRS.

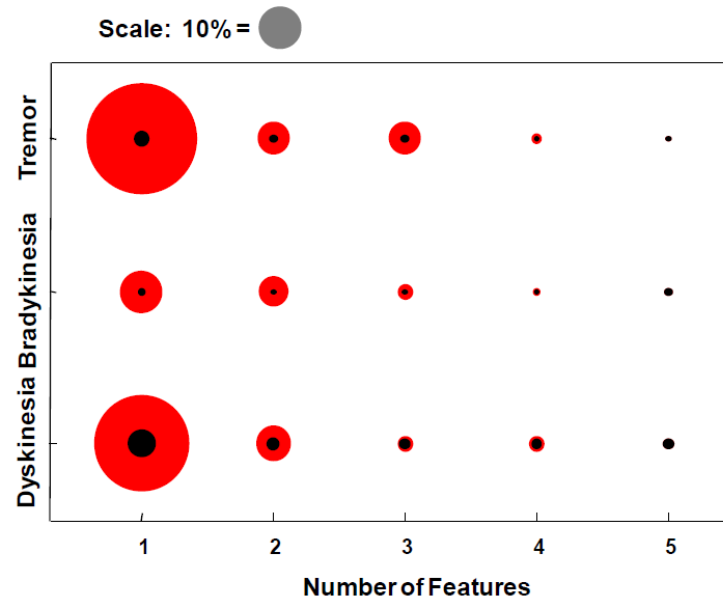
4.3.2.5. Experimentos y resultados

Las pruebas de campo de la plataforma mostraron que el sistema se puede utilizar con eficacia para recolectar datos de los pacientes con PD para evaluar la gravedad de los síntomas y las complicaciones motoras durante los ciclos de fluctuación del motor. Alentadores resultados se obtuvieron a partir del análisis de los datos de los sensores portátiles. Amplias evaluaciones se llevaron a cabo para optimizar los algoritmos.

El error de clasificación generalmente disminuyó al aumentar la longitud de la ventana que se usaba para realizar la extracción de características. Se probó longitudes de ventana que van desde 1 s a 7 s en incrementos de 1 s. El error de clasificación fue de aproximadamente 5% para el temblor, bradicinesia y la discinesia para una longitud de ventana de 5 s.

El aumento de la longitud de la ventana más allá de 5 s no produce mejoras significativas en el rendimiento de clasificación. Además, se

observó que más cortas longitudes de ventana ($\sim 1 - 2$ s) fueron adecuados para el temblor. Por el contrario, la discinesia y la bradicinesia requirieron largos segmentos de datos (~ 3.5 s) [54].



La figura. 44. Los mejores (negro) y el peor (rojo) caso de error de clasificación (%) para diferentes combinaciones de características.

En la Figura. 44, podemos ver mejores y peores resultado de los casos al considerar diferentes combinaciones de características. Para temblor, se obtuvo un error de clasificación del 6,6% usando una sola función (señal de entropía). Cuando se utilizaron dos funciones (rango RMS y datos) el error fue aproximadamente de 3%. Para bradicinesia, utilizando funciones basadas en frecuencia y rango de datos obtuvimos un error de alrededor del 2,5%. Para discinesia, logramos un error de clasificación del 3,7% usando la función de entropía de la señal y de 1,9%, utilizando las funciones de correlación y señal de entropía.

Los resultados indican que sería posible llevar a cabo la extracción de características eficientes en los nodos BSN usando el rango de datos, el valor RMS y características basadas en la frecuencia. El error de clasificación cuando se usó estos tres aspectos fueron de 3,4% para el temblor, la bradicinesia 2,2% y el 3,2% para la discinesia

4.3.2.6. Conclusiones

El trabajo que se llevó a cabo muestra que un sistema de monitorización doméstico que aprovecha la tecnología inalámbrica, sensor portátil y una aplicación basada en web puede ser confiable para obtener información clínicamente relevante para el manejo de pacientes con etapa tardía PD.

Los resultados obtenidos demostraron que las puntuaciones clínicas que miden la gravedad de los síntomas y las complicaciones motoras pueden estimar de forma fiable el uso de algoritmos para el análisis de datos de los sensores portátiles.

5. PROYECTOS ORIENTADOS AL DESARROLLO DE WSN APLICADOS A LA MEDICINA

5.1. Introducción

En esta sección se presenta un breve resumen de los diferentes proyectos orientados al desarrollo de WSN para la detección de problemas de salud. Esta información podría ser útil a médicos, investigadores, ingenieros, estudiantes interesados en el área de redes de sensores.

5.2. Relación de proyectos orientados al desarrollo de WSN aplicado a la medicina

Los signos vitales que se monitorizan más comúnmente son el ECG, oximetría de pulso, temperatura corporal, frecuencia cardíaca y la presión arterial. Algunos de estos proyectos son:

UbiMon (*Ubiquitous Monitoring Environment for Wearable and Implantable Sensors*). Tiene por objeto abordar tópicos generales relacionados con el uso de sensores portátiles de medidas no invasivas, que capturen eventos transitorios que amenacen la vida de las personas y faciliten la intervención.

SAPHE (*Smart and Aware Pervasive Healthcare Environments*).

Este proyecto tiene como objetivo desarrollar una plataforma inteligente, de supervisión no invasiva, para el análisis de tendencias de datos a largo

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

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

MobiHealth es uno de los primeros proyectos que integra todos los dispositivos sensores portátiles que una persona lleva consigo durante el día, como teléfonos móviles y relojes. Los sensores miden continuamente y transmiten los datos fisiológicos a los proveedores de servicios de salud a fin de proporcionar una asistencia remota, rápida y fiable en caso de accidente. Este proyecto es uno de los primeros estudios que propone la convergencia de los sistemas de redes diferentes como BAN (*Body Area Network*), PAN (*Personal Area Network*) y WAN (*Wide Area Network*), para permitir un servicio de cuidado de la salud móvil y personalizado.

CodeBlue: *Wireless Sensor Networks for Medical Care, Remote Arrhythmia Monitoring System Developed*, es una plataforma de hardware y software desarrollado en la Universidad de Harvard. La parte de diseño de hardware incluye el diseño y desarrollo de un oxímetro de pulso, ECG de dos vías, y un tablero sensor para el análisis de movimiento. La arquitectura de software se basa en un modelo *publish/subscribe*. CodeBlue tiene por objetivo proporcionar la coordinación y comunicación entre los dispositivos médicos inalámbricos de manera *ad hoc*. Adicionalmente se utiliza un protocolo de detección para que los nodos descubran las capacidades de sensado que poseen cada uno. También se ha integrado un sistema de localización en los nodos, denominado

MoteTrack, el cual es utilizado para localizar los pacientes y los profesionales del cuidado de la salud.

AlarmNet es una red inalámbrica de sensores médicos compuesto de cinco componentes. La red de área corporal es responsable de monitorizar variables fisiológicas y de la ubicación del paciente, esta incluye sensores de frecuencia cardíaca, saturación de oxígeno y ECG desarrollados en el proyecto CodeBlue. La red de sensores fijos proporciona información de contexto espacial y del medio ambiente como la temperatura, el movimiento y la humedad.

LifeGuard, fue desarrollado inicialmente para los astronautas, puede ser utilizado para monitorizar signos vitales. El sistema se compone de tres componentes. La parte de sensores puede soportar diferentes tipos de sensores tales como ECG, frecuencia respiratoria, oxímetro y presión arterial. Los datos de los sensores son recogidos y almacenados por un dispositivo portátil. Cuenta con acelerómetros de 3 ejes y sensores de temperatura de la piel.

FireLine está diseñado para supervisar las medidas cardíacas de los bomberos para poder tomar las acciones necesarias en el caso de presentar alguna anomalía. El dispositivo se compone de un sensor inalámbrico, un sensor de ritmo cardíaco y tres electrodos.

Baby Glove, consiste de dos sensores colocados en la parte superior del torso del bebé, que contienen un sensor de temperatura y electrodos para monitorizar la frecuencia del pulso del bebé y la hidratación.

Otros proyectos relacionados son: HUMAN++, HealthService 24, WsHC–*Wireless Health and Care*, *Fraunhofer Body Area Network*, MobiHealth, Wealthy, HEARTS, MyHeart, AUBADE: *A wearable EMG augmentation system for robust emotional understanding*.

6. CONCLUSIÓN Y LÍNEAS FUTURAS

Con este trabajo, se logrado un contacto más cercano al tema de Redes de Sensores Inalámbricos (WSN), la cual tiene multitud de aplicaciones en la sociedad actual y en ellas convergen un buen número de tecnologías de la información y comunicación

Se ha conseguido realizar un estudio minucioso del funcionamiento de las WSN, partiendo de conceptos elementales para introducirnos a aspectos que dan una visión más profunda de los elementos que componen este tipo de redes, así como la lógica de funcionamiento que existe entre ellos. También se ha visto las diversas aplicaciones que tiene esta tecnología en diferentes entornos que nos dan una idea cual es su tendencia.

Finalmente, se ha enfocado el presente estudio al ámbito médico para tener un mayor conocimiento de cuanto a evolucionado las WSN en este campo.

Líneas Futuras:

Ante una tecnología tan joven hay bastante aún por hacer en los siguientes aspectos:

- Físico: sensores más pequeños y con capacidad de procesamiento mayor.
- Software: sistemas operativos, algoritmos distribuidos, middleware, etc.
- Comunicación: protocolos de enrutamiento, mantenimiento de topología, Implementación de estrategias que disminuyan el consumo de potencia en las comunicaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Juan Vicente Capella Hernández. “Redes inalámbricas de sensores: Una nueva arquitectura eficiente y robusta basada en jerarquía dinámica de grupos”. Universidad Politécnica de Valencia. Abril del 2010.
- [2] Armando Mercado; Rafaelgil Berrios Figueroa; Paul Chan Ye. “Redes inalámbricas Ad-hoc”. Disponible en la web:
<http://facultad.bayamon.inter.edu/cgonzalezr/ELEN4618/Adhoc.pdf>
- [3] Integración de WSN en entornos inteligentes. Disponible en la web :
<https://arco.esi.uclm.es/public/papers/2008-CursoVeranoUCLM.pdf>
- [4] María Soledad Escolar Díaz. “A generic software architecture for portable applications in heterogeneous wireless sensor networks”. Tesis Doctoral Universidad Carlos III de Madrid. 2010.
- [5] Tendencias -Wireless Sensor Networks . Disponible en la web :
<http://www.coit.es/publicaciones/bit/bit165/61-64.pdf>
- [6] Wireless Sensor Network. Disponible en la web :
http://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_sensor_network
- [7] Roberto Fernández Martínez, Joaquín Ordieres Meré, Francisco Javier Martínez de Pisón Ascacíbar, Ana González Marcos, Fernando Alba Elías, Rubén Lostado Lorza, Alpha Verónica Pernía Espinoza. “Redes inalámbricas de sensores: teoría y práctica”. Universidad de la Rioja.
- [8] Chee-Yee Chong and S.P. Kumar. Sensor networks: evolution, opportunities, and challenges. *Proceedings of the IEEE*, 91(8):1247–1256, Aug. 2003.
- [9] Edgar Javier Cobos Hernández. “Estudio de las redes sensoriales como una nueva alternativa de comunicación inalámbrica”. 2007.
- [10] Portable Intrusion Detection System (PIDS). Disponible en la web:
<http://www.pid-systems.co.uk/>.
- [11] Camalie Networks Wireless Sensing. Disponible en la web:
<http://camalie.com/WirelessSensing/WirelessSensors.htm>
- [12] Y. Sankarasubramaniam I. Akyildiz, S.Weilian and E. Cayirci. ”A survey on sensor networks”. *IEEE Communications Magazine*, 40(8):102-114, Aug. 2002, 1997.
- [13] In Proc. of the First International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA'02), pages 88-97, Atlanta, Georgia. “Wireless sensor networks for habitat monitoring”. Sep. 2002.

- [14] In Proc. of SPIE Symposium on Smart Structures and Materials, pages 477-484, San Diego, CA." Wireless sensors for wild-fire monitoring". Mar. 2005.
- [15] Y. Her B. Son and J. Kim. "A design and implementation of forest-fires surveillance system based on wireless sensor networks for south korea mountains". *International Journal of Computer Science and Network Security (IJCSNS)*, 6(9):124-130, 2006.
- [16] Protocolo CAN. Disponible en la web:
<http://www.can-cia.org/>
- [17] Web de eSafety Support. Disponible en la web:
<http://www.esafetysupport.org/>
- [18] Trackss: Disponible en la web:
<http://www.trackss.net>
- [19] Página Web de Caring Cars: Disponible en la web:
<http://www.tid.es/netvehicles/caringcars/portal/home.htm>
- [20] Towards Embedded Wireless – Networked Intelligent Daylighting Systems for Commercial Building; Yao-Jung Wen, Jessica Granderson, Alice M. Agogino.
- [21] Sukun Kim; Pakzad, S.; Culler, D.; Demmel, J.; Fenves, G.; Glaser, S.; Turon, M. "Health Monitoring of Civil Infrastructures Using Wireless". *Information Processing in Sensor Networks*, 2007. IPSN 2007. 6th International Symposium on. Digital Object Identifier: 10.1109/IPSN.2007.4379685. Page(s): 254 – 263. Publication Year: 2007.
- [22] César Vergara Martel. (2011). Redes de sensores inalámbricos para el análisis de vibraciones. Disponible en la web:
<http://cursos.die.udec.cl/~jpezoa/memorias/20110930-cvergara>
- [23] David Magín, Flórez Rubio; Camilo Otálora Sánchez; Carlos Iván Páez-Rueda. "Diseño e implementación de una red de sensores para la adquisición de variables relacionadas con la vigilancia estructural de puentes". Universidad de Bogotá, Colombia.2009. Disponible en la web:
<http://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3176211.pdf>
- [24] G. Hoblos, M. Staroswiecki, and A. Aitouche. "Optimal design of fault tolerant sensor networks", pp. 467-472, August 2002.
- [25] Bulusu *et al.*, "Scalable Coordination for Wireless Sensor Networks: Self-Configuring Localization Systems", *ISCTA 2001*, Ambleside, U.K, Jul. 2001.

- [26] Woo, A. and Culler, D. "A Transmission Control Scheme for Media Access in Sensor Networks", *Proc. ACM MobiCom '01*, Rome, Italy, July 2001, pp.221–35.
- [27] Kahn, J.M. Katz, R.H. and Pister, K.S.J. "Next Century Challenges: Mobile Networking for Smart Dust", *Proc. ACM MobiCom '99*, Washington, DC, 1999, pp. 271–78.
- [28] Gascón, David. 802.15.4 vs ZigBee. Wireless Sensor Networks Research Group,
17 de noviembre de 2008. Disponible en la web:
<http://www.sensornetworks.org/index.php?page=0823123150>
- [29] Estándar IEEE 802.15.4. Disponible en la web:
http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/archundia_p_fm/capitulo4.pdf
- [30] Estándar 802.11
<http://multingles.net/docs/Manual%20-%20Redes%20WiFi%20inalambricas.pdf>
- [31] Estándar IEEE 802.15.1
<http://www.ieee802.org/15/pub/TG1.html>
- [32] Jennic. IEEE 802.15.4 Wireless Networks User Guide. Oct. 2006.
http://www.jennic.com/files/support_files/JN-UG-3024-IEEE802.15.4-1v1.pdf
- [33] William C. Craig Program Manager Wireless Communications; ZMD America, Inc.
"Zigbee: Wireless Control That Simply Works"
- [34] Philip Levis, Sam Madden, Joseph Polastre, Robert Szewczyk, Kamin Whitehouse, Alec Woo, David Gay, Jason Hill, Matt Welsh, Eric Brewer y David Culler. "TinyOS: An Operating System for Sensor Networks".
- [35] David Gay, Philip Levis, Robert von Behren, Matt Welsh, Eric Brewer, David Culler. "The nesC Language: A Holistic Approach to Networked Embedded Systems".
- [36] J. L. López and S. M. Doce. Desarrollo de un demostrador para evaluar técnicas cross-layer en sistemas de comunicaciones inalámbricos, Marzo 2008.
- [37] Contiki Tema – Swedish Institute of Computer Science, SICS. Disponible en la web:
<http://www.sics.se/contiki/>
- [38] eCos Community. Disponible en la web:
<http://ecos.sourceware.org/>
- [39] Abrach, H., Bhatti, S., Carison, J. et all. "Mantis: System Support for Multimodal NeTworks of In-situ Sensors". 2nd ACM International Workshop on

Wireless Sensor Networks and Applications, WSNA. San Diego, EEUU: s.n., 2003.

[40] Kiran Kanukurthy, Usha Viswanathan. "Controller for a Continuous Near Infrared Glucose Sensor". Sensors for Industry Conference. Texas. 2007.

[41] Watthanawisuth, N. "Wireless wearable pulse oximeter for health monitoring using ZigBee wireless sensor network". Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2010 International Conference. 2010.

[42] Schwiebert, L., Gupta, S.K.S., Auner, P.S.G., Abrams, G., Lezzi, R., McAllister, P.: "A Biomedical Smart Sensor for Visually Impaired". IEEE Sensors 2002, Orlando, (2002)

[43]. Soofi, W. "Nanoscale Surface Acoustic Wave Sensors for Early Cancer Detection". The 2005 NNIN REU, California.2005.

[44] Kioumars, A. H., & Tang, L. "Wireless network for health monitoring: Heart rate and temperature sensor". Paper presented at the Proceedings of the International Conference on Sensing Technology. 2011.

[45] W. Ealker, T. Polk, A. hande, D. Bhatia, "Remote Blood Pressure Monitoring Using a Wireless Sensor Network". University of Texas at Dallas.

[46] K. Lorincz, et. al, "Sensor Networks for Emergency Response: Challenges and Opportunities", Pervasive Computing, IEEE , vol.3, n^o.4, pp. 16- 23, Oct.-Dec. 2004.

[47] B. Sidhu, H. Singh, A. Chhabra, "Emerging Wireless Standards- WiFi, ZigBee and WiMAX". World Academy of Science, Engineering and technology 25 2007.

[48] Burton AC. Human Calorimetry: The average temperature of the tissues of the body. J Nutr. 1935;9:261–280.

[49] Arduino Hardware and Software. Rertrieved on July 15, 2011 from <http://www.arduino.cc>

[50] ZigBee Technology. Rertrieved on July 18, 2011 from <http://www.digi.com>

[51] Snellen JW. Mean body temperature and the control of sweating. Acta Physiol Neerl. 1966;14:99–174.

[52] J.P. Lynch, "Overview of Wireless Sensors for the Real-Time Health Monitoring of Civil Structures," Proc. Of the 4th International Workshop on Structural Control and Monitoring, New York, NY, June 10-11, 2004

[53] T. Aoyagi, "Pulse oximetry: its invention, theory, and future," Journal of Anesthesia, 2003. pp. 259-66.

[54] Shyamal Patel, Bor-rong Chen, Thomas Buckley, Ramona Rednic, Doug McClure, Daniel Tarsy, Ludy Shih, Jennifer Dy, Matt Welsh, Paolo Bonato. (2010). "Home monitoring of patients with parkinson's disease via wearable technology and a web-based application". Paper presented at the 2010 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC'10, 4411-4414. 2010.

[55] S. Patel, K. Lorincz, R. Hughes, N. Huggins, J. Growdon, D. Standaert, M. Akay, J. Dy, M. Welsh, and P. Bonato. "Monitoring motor fluctuations in patients with Parkinson's disease using wearable sensors". IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, vol. 13, pp. 864-873. 2009.

[56] K. Lorincz, B. Chen, G.W. Challen, A.R. Chowdhury, S. Patel, P. Bonato, and M. Welsh, "Mercury: A wearable sensor network platform for high-fidelity motion analysis". Conference On Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'09), pp. 183-196. 2009.