

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PUCP

**DISEÑO DE UNA RED DE SENSORES PARA MEDIR VARIABLES
AMBIENTALES UTILIZANDO 6LoWPAN**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Electrónico

AUTOR

Manuel Antonio Chávez Salinas

ASESOR

Mag. Ing. Luis Angelo Velarde Criado

2020

Resumen

Las redes inalámbricas que se usan en la actualidad a menudo presentan fallas y no representan una alternativa fiable para la mayoría de las aplicaciones que requieren mantener la integridad de la información. Por este motivo, se empezó a explorar la posibilidad de implementar nuevos protocolos y topologías para interconectar los dispositivos pertenecientes a una red.

Este proyecto de tesis se centra en el diseño de una red inalámbrica utilizando 6LoWPAN en topología tipo mesh, donde se estudia sus características y se analiza su fiabilidad para aplicaciones en general. Para poder observar el flujo de información y como circula por toda la red, se toma muestras de variables ambientales como temperatura y humedad, generando una red de sensores inalámbrica que, a diferencia de las comúnmente usadas, presenta un riesgo mínimo de pérdida de datos y enfatiza la importancia de una red que emplea 6LoWPAN.

En este trabajo de tesis, se emplea el software Contiki OS para programar el algoritmo que permite implementar todas las características que se requieren para garantizar la eficacia de la red 6LoWPAN en topología mesh. Asimismo, se hace uso del simulador Cooja para diseñar la red y validar sus características mediante diversas pruebas en simulaciones y el nodo Tmote Sky para validar la robustez de la red mediante hardware.

El desarrollo del proyecto permitió visualizar como las variables ambientales, cuyas muestras han sido tomadas por cada nodo, circulan en la red inalámbrica y se generó un interfaz para poder apreciar a los nodos vecinos, así como la información que transmiten.

A Dios, por permitirme recorrer este camino.

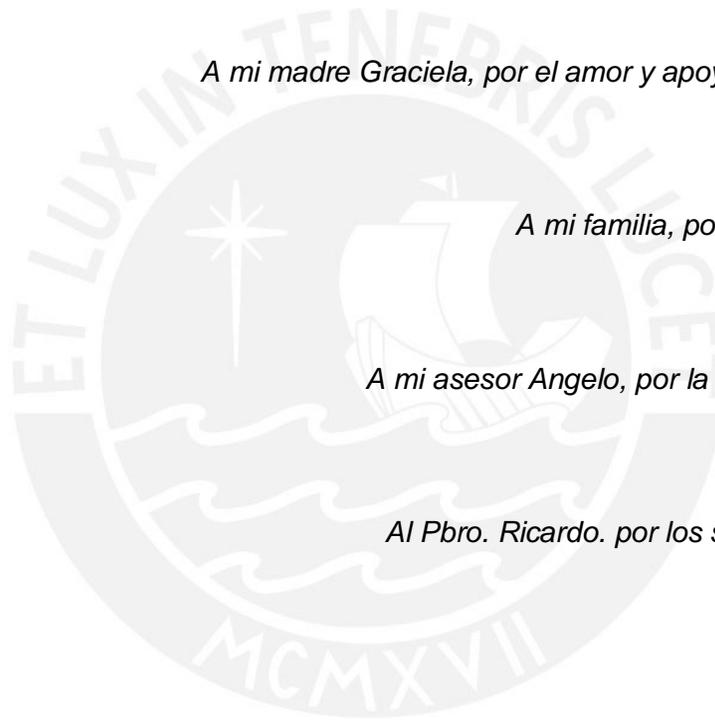
A mi madre Graciela, por el amor y apoyo incondicional.

A mi familia, por darme ánimos.

A mi asesor Angelo, por la ayuda brindada.

Al Pbro. Ricardo, por los sabios consejos.

Gracias.



ÍNDICE GENERAL

Índice de tablas

Índice de figuras

Introducción	1
1. 6LoWPAN como alternativa en redes de sensores	2
1.1. Problemática.	2
1.2. Estado del arte	3
1.3. Justificación - Protocolo 6LoWPAN	5
1.3.1. Comunicación inalámbrica	5
1.3.2. Consumo de energía de la red	6
1.4. Objetivos	7
1.4.1. Objetivo general.	7
1.4.2. Objetivos específicos	7
2. Fundamentos para el desarrollo del diseño de una red 6LoWPAN	8
2.1. Protocolo IEEE 802.15.4	8
2.1.1. Topologías de red	8
2.1.1.1. Topología estrella	8
2.1.1.2. Topología par a par	9
2.1.2. Arquitectura	9
2.2. Protocolo de internet versión 6 (IPv6)	13

2.2.1. Fundamento teórico	13
2.2.2. Comparación con IPv4	13
2.3. 6LoWPAN	14
2.3.1. Concepto y definición	14
2.3.2. Arquitectura de una red con 6LoWPAN	14
2.3.3. Pila del estándar	15
2.3.4. Ipv6 en 6LoWPAN	16
2.4. Topología de red tipo mesh	17
2.4.1. Definición y características	17
2.5. Software y hardware	18
2.5.1. Contiki OS	19
2.5.2. Simulador Cooja	20
2.5.3. Tmote Sky	21
3. Diseño de la red de sensores para medir variables ambientales con 6LoWPAN	23
3.1. Diseño de la red en topología mesh	23
3.1.1. Delimitación del área	24
3.1.2. Simulador Cooja	25
3.2. Algoritmos y software en Contiki OS	26
3.2.1. Adquisición de data	27
3.2.2. Comunicación IPv6 en la red mesh	28

3.3. Tmote Sky y su aplicación	29
3.3.1. Potencia de transmisión de la señal	31
3.3.2. Componentes del nodo: microcontrolador, sensores y RF	31
4. Resultados y validación	33
4.1. Robustez y fiabilidad de la red	34
4.1.1. Tiempo real	34
4.1.2. Adaptabilidad	34
4.1.3. Rendimiento eficaz	35
4.2. Ventajas de emplear topología mesh en 6LoWPAN	36
4.2.1. Adoptar un nodo	36
4.2.2. Eliminar un nodo	36
4.3.3. Envío la información en la red	36
4.3. Resultados respecto a la adquisición de data	37
4.3.1. Algoritmo	40
4.3.2. Flujo de información	41
4.3.3. Interfaz para mostrar la data	41
4.4. Validación y proyección final	44
4.4.1. Costos del proyecto	47
Conclusiones	48
Recomendaciones	49
Bibliografía	50

Índice de tablas

Tabla 2.1. Capa física comparación	12
Tabla 3.1. Datos de operación de los sensores del NITOS XBee	30
Tabla 3.2. Rangos de trabajo y operación de los sensores del Tmote Sky	32
Tabla 4.1. Resultados de la red diseñada y validada para once nodos	44
Tabla 4.2. Costo de la red	46

Índice de figuras

Figura 2.1. Topología Estrella [7]	9
Figura 2.2. Topología par a par [7]	9
Figura 2.3. Pila OSI [8]	10
Figura 2.4. Canalización de capa física [8]	12
Figura 2.5. Comparación de los encabezados IPv4 e IPv6 [8]	13
Figura 2.6. Diagrama 6LoWPAN [8]	15
Figura 2.7. Comparación de pila de Wi-Fi y 6LoWPAN [8]	16
Figura 2.8. Topología tipo mesh	18
Figura 2.9 Simulación Cooja	19
Figura 2.10 Tmote Sky	21
Figura 2.11 Diagrama de bloques del Tmote Sky	21
Figura 3.1. Lugar de prueba situado en el Colegio San Norberto	25
Figura 3.2. Red de sensores tipo mesh	26
Figura 3.3. Algoritmo de toma de datos	27
Figura 3.4. Porción de código para envío de data	28

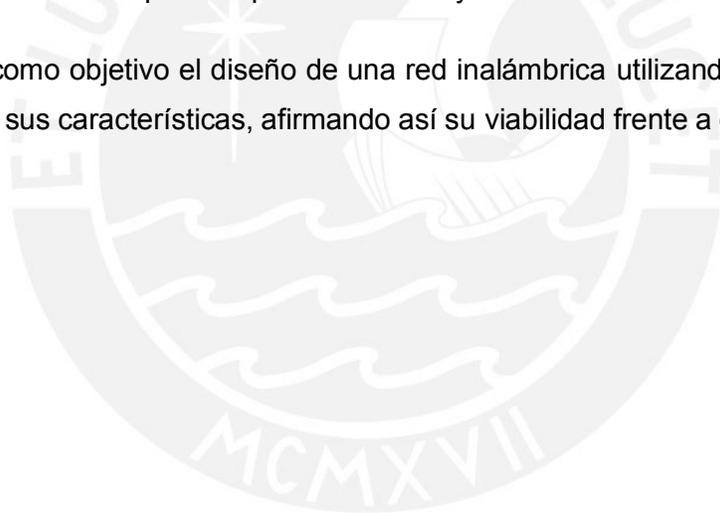
Figura 3.5. Nodo NITOS XBee	29
Figura 3.6. Nodo Tmote Sky	30
Figura 3.7. Potencia de la señal a la salida del nodo	31
Figura 3.8. Curvas de los sensores incorporados	32
Figura 4.1. Área de prueba 1	33
Figura 4.2. Área de prueba 2	33
Figura 4.3. Potencia en los nodos	34
Figura 4.4. Porción de algoritmo para envío de data en la red	36
Figura 4.5 Resultados de medición de humedad	37
Figura 4.6 Resultados de medición de temperatura	37
Figura 4.7 Resultados de medición de luz	38
Figura 4.8. Porción de código principal	39
Figura 4.9. Visualización de red	40
Figura 4.10. Análisis de 6LoWPAN	40
Figura 4.11 Interfaz inicial	41
Figura 4.12. Medición ambiental de un nodo	41
Figura 4.13. Consumo de energía del nodo	42
Figura 4.14. Medición ambiental del nodo vecino	42
Figura 4.15. Consumo de energía del nodo	42
Figura 4.16. Red de once nodos	43
Figura 4.17. Ciclo de trabajo radial promedio	45

Introducción

La tecnología es parte fundamental en la vida de toda persona, y con los avances tecnológicos se genera la necesidad de conocer la mayor cantidad de información posible y tener la seguridad que dicha información es verídica. Un claro campo donde esto es aplicado son las redes inalámbricas, donde a medida que avanza el tiempo las aplicaciones en las cuales intervienen van desde sensores hasta complejos sistemas de energía, donde es necesario conocer los datos que se requieran de manera continua y sin pérdida.

Para ello, es necesario explorar nuevas alternativas dado que las redes conocidas en la actualidad presentan muchas limitaciones, ya sea por su topología o su estructura interna. Es así como una red de sensores de tipo mesh, donde la data circula a lo largo de toda la red y logra juntar estas características con las que trae consigo emplear 6LoWPAN, se genera una gran alternativa para lo que se busca hoy en día.

Esta tesis tiene como objetivo el diseño de una red inalámbrica utilizando 6LoWPAN para verificar y validar sus características, afirmando así su viabilidad frente a otro tipo de redes.



Capítulo 1

6LoWPAN como alternativa en redes de sensores

1.1. Problemática

En la actualidad, existen variables dentro de un campus universitario que deben ser tomadas en cuenta para mejorar los servicios que se brindan, proteger el medio ambiente y reducir el impacto negativo. Durante los últimos años se ha hecho énfasis en medir las variables ambientales que están presentes en los campus universitarios en diferentes países llegando al punto en común que son parámetros necesarios para mejorar la calidad de vida dentro de una universidad [4] [5].

Para este estudio, se tomará como ejemplo el campus universitario de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) y las variables que afectan directamente el ambiente dentro del campus. Para ello, se está trabajando en conjunto con el grupo de Internet de las cosas de la PUCP (IoT PUCP) y su proyecto para mejorar la calidad de servicios y espacios en la universidad llamado PUCP Senseable Campus Lab.

En este proyecto general, el grupo de investigación ha lanzado un proyecto piloto llamado Smart Grid que busca reducir el consumo de energía a únicamente lo necesario dentro de la universidad, evitando así la contaminación excesiva y contribuyendo con preservar el medio ambiente. Esto es un claro ejemplo de cómo la universidad se preocupa por reducir su consumo energético y su impacto negativo en el ambiente, para lo cual se necesita tomar muestras de datos con los sensores.

Las variables que se han elegido como aplicación de la red de sensores a diseñar han sido dadas como requerimiento por el grupo IoT PUCP y son las siguientes:

- Intensidad luminosa
- Temperatura
- Humedad

Es en este análisis, que surge la necesidad de encontrar tipos de redes que garanticen un sistema de monitoreo constante en tiempo real que permita el estudio y desarrollo de estas nuevas tecnologías. Por ello, es necesario encontrar qué tipo de red puede adecuarse mejor a las características del proyecto que se desea realizar.

La problemática que se busca resolver consta en brindar al grupo de IoT una alternativa diferente a las redes comercialmente conocidas, como Wi-Fi. Dado que su proyecto piloto es una aplicación sobre energía se necesita la mayor precisión posible, así como continuidad entre las muestras tomadas por los sensores en intervalos de tiempo muy pequeños.

En complemento a lo mencionado, las redes de sensores inalámbricas de bajo consumo energético (LoWPAN, Low-power Wireless Personal Area Network) no están diseñadas para distribuirse a lo largo de una gran área como un campus universitario puesto que esto demandaría la construcción de torres para instalar antenas, lo que va en contra de su fundamento de ser de bajo consumo y ocuparía mayor espacio. Debido a ello, es necesario diseñar una red de sensores que sea de bajo consumo energético brindando a la universidad donde se instale, la facilidad de saber que la red que se está empleando no será costosa ni traerá problemas de consumo de energía.

Por todo lo mencionado, se desarrollará en esta tesis el diseño de una red de sensores inalámbrica basada en el estándar 6LoWPAN, que permite el uso de IPV6 en redes inalámbricas de bajo consumo, en topología de red tipo *mesh*, cuya estructura será definida en el siguiente capítulo. De esta manera, se comprobará que al tratarse de esta topología en particular y emplear 6LoWPAN se logra completar los espacios en blanco que presentaba el protocolo IEEE 802.15.4 y se solucionarán los problemas que traen las WSN convencionales, debido a que se permitirá a los nodos comunicarse por sí mismos con internet y entre ellos.

1.2 Estado del arte

Hoy en día, se hace uso de las redes de sensores inalámbricas para tomar muestras de diversas variables según el rubro que se desee trabajar y el propósito de implementar dicha red.

Nurul Fahmi, et al[1] desarrollaron un prototipo para monitorear agricultura de precisión empleando una red de sensores. Este prototipo desarrollado en Indonesia e implementado

en el jardín de semillas en la ciudad de Surabaya en Wonorejo, tuvo como objetivo la medición de humedad, temperatura, presión y humedad del aceite del suelo.

Para realizarlo, se diseñaron “nodos de sensores agrícolas”, donde cada nodo contó con sensores para cada una de las variables a medir mencionadas. En el aspecto energético, se alimentó cada nodo con una batería de 3.7V y 1150mAh.

A medida que los nodos recolectaban la información, la enviaban al Gateway, haciendo uso del protocolo Zigbee IEEE 802.15.4, donde se guardaban temporalmente en una memoria de 8GB, para luego ser almacenado permanentemente en un servidor, en el cual las personas designadas podrían ver la data sin problemas.

Otro aspecto que sin duda es importante tomar en cuenta, es como algunas aplicaciones de las redes de sensores requieren que no consuma mucha potencia. Una clara muestra de ello es el sistema de monitoreo para celdas solares basado en una red de sensores inalámbrica de baja potencia que se desarrolló en la Universidad de Brawijaya, Malang en Indonesia por Raden Arief Setyawan, et al[2].

En este artículo se hizo uso de nodos que contienen sensores de voltaje, corriente, humedad y temperatura. De esta manera, se diseñó e implementó una red de sensores inalámbrica donde cada nodo era energizado por el mismo sistema fotovoltaico consumiendo la mínima potencia posible.

La comunicación es similar al caso anterior ya que cada nodo envía la información tomada por los sensores al Gateway donde luego de la sincronización se enviará a un servidor para almacenar la información.

En adición a lo mencionado, en el mismo año Oran Chieochan, et al[3] estudió energía solar inteligente en una “granja inteligente” en la Universidad de Maejo en Chiang Mai, Tailandia. Dicho estudio a diferencia del artículo previamente descrito da más énfasis al uso de las redes inalámbricas de sensores como parte de internet de las cosas (IoT) que a desarrollar una red de bajo consumo.

En este estudio se empleó tecnología Wi-Fi para conectar la red al access point de la universidad y así poder entablar el sistema en tiempo real donde se mide el nivel de voltaje y corriente que está generando el panel solar. Además, se hizo uso de Blynk, un servicio de plataforma para IoT donde se conectó los nodos y una aplicación de celular, mediante la cual los usuarios pudieron acceder a ver la data en tiempo real.

Putra y Made de la universidad Udayana en Indonesia[4] elaboraron un monitoreo ambiental como una aplicación de IoT para formar un campus inteligente haciendo uso de este

sistema en tiempo real, en el cual se pueda tener acceso a la data ubicado en cualquier lugar y así, poder observar qué sucede con las variables ambientales.

En la propuesta descrita en el artículo se analiza que la comunicación inalámbrica en esta aplicación puede hacerse mediante ESP8266 o XBee 802.15.4 RF. La primera opción es para comunicar los nodos directamente a internet ya que viene con un módulo Wi-Fi integrado y la segunda necesita pasar por un Gateway para gestionar los datos, enviarlos a la nube y al servidor.

En este año, Huang-Chen Lee y Hai-Hsiang Ke [5] diseñaron una red de sensores inalámbrica de largo alcance en topología tipo mesh y la implementaron en el campus de la Universidad Nacional de Chung Cheng en Taiwan. Se hizo uso de un Gateway el cual recibía la data de los nodos y se ve como la red se adapta automáticamente a los cambios que puedan suceder en el entorno, mostrando las características de esta topología como la mejor opción para una red inalámbrica que sea de monitoreo constante.

Se ha podido apreciar en diversos artículos que las redes de sensores inalámbricas que predominan en las aplicaciones son de tipo estrella (Wi-Fi, árbol, etc.) y de tipo mesh, las cuales presentan diferentes características que serán explicadas posteriormente.

1.3. Justificación para la utilización de 6LoWPAN

Se ha podido observar cómo se desarrolla esta tecnología en países desarrollados. Se puede apreciar cómo el diseño de la red que se va a emplear depende de lo crítico de recibir la información en tiempo continuo. Para este caso, se desea desarrollar una red de sensores inalámbrica de bajo consumo de energía en topología mesh utilizando el protocolo 6LoWPAN, que significa por sus siglas en inglés IPv6 over Low-power Wireless Personal Area Network. Las ventajas que brinda el uso de IPv6 en una red inalámbrica de sensores en combinación con una topología tipo mesh serán analizadas primero por separado.

1.3.1. Comunicación inalámbrica

Para que la comunicación entre nodos pueda ser efectiva se emplea IPv6 y el protocolo IEEE 802.15.4.

Se hace uso de IPv6 puesto que tiene muchas ventajas en comparación a su antecesor que es IPv4. Entre ellas se encuentran:

- Capacidad de direccionamiento
- Movilidad
- Autoconfiguración
- Multicast mejorado
- Seguridad obligatoria

De igual manera, el protocolo IEEE 802.15.4 fue especialmente diseñado para las redes de sensores inalámbricas y define el nivel físico y el control de acceso al medio de redes inalámbricas de área personal con tasas bajas de transmisión de datos.

Entre sus principales características, resaltan las siguientes:

- Interconexión de datos
- Bajo consumo energético
- Sistemas en Tiempo Real
- Tasas bajas de transmisión de datos

1.3.2. Consumo de energía de la red

Como se ha podido apreciar, se requiere que la red sea de bajo consumo de energía puesto que estará constantemente encendida monitoreando las variables ambientales y en caso se cambie la aplicación, de igual manera es necesario que sea de bajo consumo energético, pues ya sea medir las variables descritas o el proyecto piloto Smart grid, se requiere no dañar el medio ambiente y al ahorrar energía se cumple con este requerimiento.

Es así como las características que presenta una red inalámbrica de sensores utilizando la comunicación inalámbrica descrita y poco consumo de energía hacen notar que el problema planteado tiene una solución efectiva. Sin embargo, es necesario elegir la topología de red adecuada para la red que se va a diseñar y así poder obtener todas las características que se necesitan para ser una red fiable y sin riesgo de pérdida de información. En el siguiente capítulo se podrá apreciar la red tipo mesh que será la topología a emplear y lo que la distingue de las demás.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo principal

Diseñar una red de sensores inalámbrica utilizando 6LoWPAN empleando una topología tipo mesh para brindar al grupo IoT PUCP una alternativa de solución.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Determinar las características del protocolo 6LoWPAN con la finalidad de establecer sus ventajas respecto a la aplicación propuesta.
2. Aplicar el sistema operativo Contiki para transmitir, recibir y retransmitir mensajes entre diez nodos.
3. Emplear 6LoWPAN en los nodos al enviar y recibir información en la red.
4. Definir una red de evaluación (setup de pruebas) empleando los módulos Tmote Sky para evaluar sus principales características.
5. Aplicar la red de sensores inalámbrica, conformada por diez nodos, para tomar muestras de humedad ambiental, temperatura e intensidad luminosa.
6. Determinar la viabilidad, robustez y eficiencia de la red diseñada.

Capítulo 2

Fundamentos para el desarrollo del diseño

2.1 Protocolo IEEE 802.15.4

El protocolo IEEE 802.15.4 es un protocolo estándar definido para la interconexión de datos entre equipos en una red inalámbrica de área personal de baja tasa de transmisión, o mejor conocida por sus siglas en inglés como LR-WPAN (Low Rate – Wireless Personal Area Network).

Existen dos tipos de nodos que se pueden implementar en una red IEEE 802.15.4. Los completamente funcionales (Fully Functional Devices, FFD) y los parcialmente funcionales (Reduced Functional Devices, RFD). Los primeros pueden operar como coordinadores de una red de área personal o como un nodo genérico en la red. Un equipo FFD puede comunicarse con otro equipo FFD o con un RFD, mientras que los RFD sólo pueden comunicarse con un FFD.

2.1.1. Topologías de red

El protocolo IEEE 802.15.4 permite implementar con facilidad dos topologías de red, las cuales son topología estrella y topología par a par.

En ambas topologías, los nodos pertenecientes a la red poseen una dirección única de 64 bits o una de 16 bits. Las direcciones de 16 bits se emplean para poder comprimir los encabezados una vez que ya haya ocurrido el proceso de sincronización.

2.1.1.1 Topología Estrella

Este tipo de topología, mostrada en la figura 2.1, se caracteriza por tener un nodo coordinador de la red el cual administra y regula la comunicación que se establece entre los otros nodos de la red. Un nodo genérico que es parte de esta red suele disponer de una aplicación que indica cuándo iniciar y terminar la comunicación propia de dicho nodo.

Así mismo, el coordinador de la PAN posee una aplicación más compleja que permite iniciar, finalizar y enrutar la comunicación entre nodos pertenecientes a la red.



Figura 2.1. Topología Estrella [7]

La secuencia para poder iniciar una red con esta topología consiste en que un nodo FFD se active y se convierta en el coordinador de la red, mediante el cual los demás dispositivos o nodos puedan conectarse a la red.

2.1.1.2. Topología tipo par a par

Esta topología de red, ilustrada en la figura 2.2, se caracteriza por la interconexión entre dos o más nodos sin tener la necesidad de enviar información mediante el coordinador para llegar al destinatario. A diferencia de la topología tipo estrella, la necesidad de nombrar un nodo coordinador desaparece y se nombra coordinador al nodo que inicie la comunicación en el canal de la red.

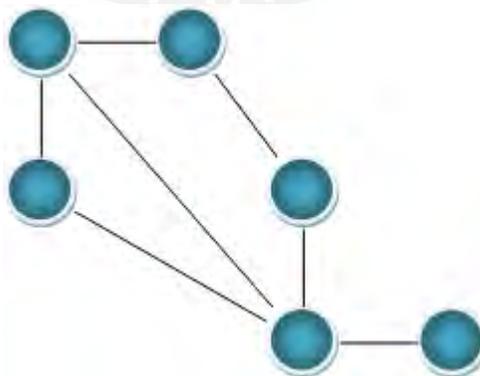


Figura 2.2. Topología par a par [7]

Tomando como base esta topología, se da origen a la topología de red tipo mesh cuyas características se describirán posteriormente tomando las virtudes de interconectar los datos de tal manera que la red adquiera la cualidad de ser robusta y fiable para los nodos que la conforman.

2.1.2. Arquitectura del protocolo IEEE 802.15.4

Existe un modelo OSI, presentado en la figura 2.3, que muestra las capas en la interconexión de sistemas. Este protocolo define solo la primera y segunda capa para poder establecer una conexión entre los nodos que conforman la red. Estas capas son la capa física (PHY) y capa de nivel de enlace de datos, donde se encuentra el control de acceso al medio (MAC)



Figura 2.3. Pila OSI [8]

2.1.2.1. Capa Física

El protocolo IEEE 802.15.4 cuenta con dos opciones de capa física que se basan en métodos de secuencia directa de espectro extendido (conocido por sus siglas en inglés como DSSS).

La principal diferencia entre ambas radica en la banda de frecuencias. La banda de 2.4GHz está disponible a nivel mundial, mientras que la capa física de los 868/915MHz se da 868 MHz en Europa y 915 MHz en Estados Unidos.

Existe una segunda distinción de las características de la capa física: la tasa de transmisión. La capa física de 2.4GHz permite una tasa de transmisión de 250 kbps, mientras que la PHY de los 868/915 MHz ofrece tasas de transmisión de 20 kbps y 40 kbps respectivamente. La mayor tasa de transmisión de la banda de los 2.4GHz se atribuye principalmente a un mayor orden en la modulación. En la tabla 2.1 se muestra una comparación referente a la capa física.

Tabla 2.1. Capa física comparación [7]

PHY (MHz)	Frequency band (MHz)	Spreading parameters		Data parameters		
		Chip rate (kchip/s)	Modulation	Bit rate (kb/s)	Symbol rate (ksymbol/s)	Symbols
868/915	868–868.6	300	BPSK	20	20	Binary
	902–928	600	BPSK	40	40	Binary
868/915 (optional)	868–868.6	400	ASK	250	12.5	20-bit PSSS
	902–928	1600	ASK	250	50	5-bit PSSS
868/915 (optional)	868–868.6	400	O-QPSK	100	25	16-ary Orthogonal
	902–928	1000	O-QPSK	250	62.5	16-ary Orthogonal
2450	2400–2483.5	2000	O-QPSK	250	62.5	16-ary Orthogonal

2.1.2.1.1. Canalización

En el protocolo IEEE 802.15.4 se definen 27 canales de frecuencia entre las tres bandas, distribuidos como ilustra la figura 2.4.

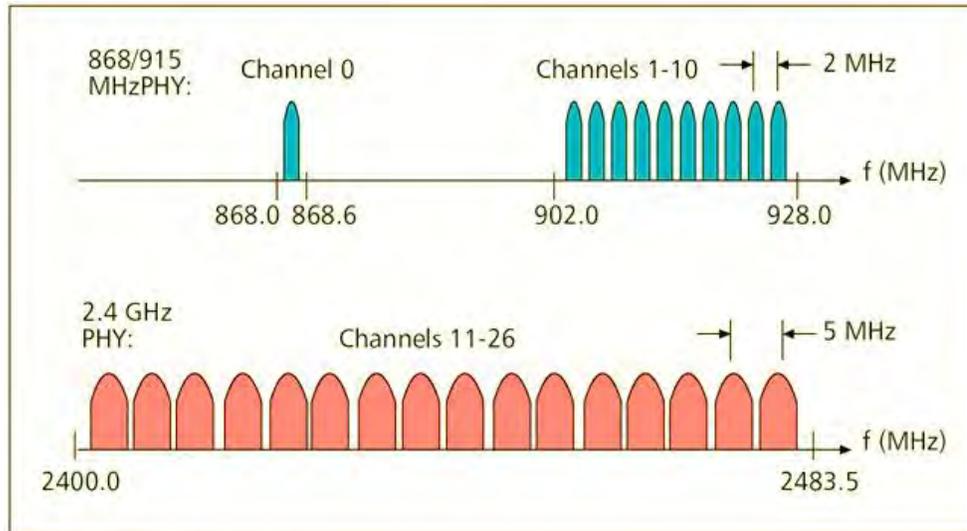


Figura 2.4. Canalización de capa física [8]

- Banda de 868 MHz: soporta un solo canal.
- Banda de 915 MHz: soporta 10 canales entre las frecuencias 902 MHz y 928 MHz.
- Banda de 2.4 GHz: soporta 16 canales entre las frecuencias 2.4 MHz y 2.4835 MHz con una separación de 5 MHz entre cada canal.

2.1.2.2. Capa MAC

La Capa MAC del protocolo define numerosos protocolos y mecanismos. Entre ellos se pueden encontrar:

- Administración de las Supertramas.
- Acceso al Canal.
- Validación de marcos.
- Entrega de tramas de reconocimiento.
- Asociación y disociación.

2.2. Protocolo de Internet versión 6

2.2.1. Fundamento teórico

IPv6 tiene la capacidad de permitir a un mayor número de dispositivos conectarse a una misma red a comparación del protocolo anterior. Además, hay un mejor entendimiento del encabezado, así como una simplificación y mejora del mismo. Se usan 128 bits para representar una sola dirección. Es decir, 2^{128} direcciones posibles.

2.2.2. Comparación con IPv4

Cuando se comparan ambos encabezados, como se muestra en la figura 2.5, es evidente observar que el de la versión 6 es más simple. Esto se traduce en una mejor eficiencia al momento de tratar los paquetes al existir menos información que procesar.



Figura 2.5. Comparación de los encabezados IPv4 e IPv6 [8]

A su vez, el hecho de que el encabezado básico en IPv6 tenga un tamaño fijo incrementa la eficiencia. Ahora, los enrutadores no tienen que implementar procesos de búsqueda dentro del encabezado para buscar otros encabezados ya que cada paquete que llegue en la versión 6, siempre tendrá los primeros 40 bytes con el mismo significado.

La fragmentación de paquetes en IPv6 se realiza ahora por el ente que envía un paquete. Antes de enviar un paquete, la fuente estudia el MTU del “camino” del paquete y de acuerdo con estos resultados, fragmenta el paquete adecuadamente. Así, los routers pueden procesar los paquetes en forma más rápida debido a que estos ya no realizan fragmentación de algún tipo.

El proceso de cambiar la numeración en una red ahora es mucho más sencillo. Lo que se requiere es que el router detenga sus mensajes de Router Advertisement con el prefijo antiguo y realice nuevos mensajes mostrando el nuevo prefijo. Así, cuando un nodo recibe un nuevo prefijo, crean automáticamente su nueva dirección.

Así mismo, IPv6 cuenta con autoconfiguración lo cual significa que dentro de la red ya establecida al agregarse nuevos nodos se envían solicitudes a los nodos vecinos y al responderlas mediante ruteo se admiten a la nueva red. Esta característica será aprovechada para poder formar la topología tipo mesh y empleando a su vez IPv6. Cabe recalcar que la información detallada para este proceso de autoconfiguración se encuentra en un documento llamado RFC2462 “IPv6 Stateless Address Autoconfiguration” el cual se ha usado para ver las primeras nociones que se tuvo sobre este protocolo y contrastarlo con los diversos artículos de la actualidad.

2.3. 6LoWPAN

2.3.1. Concepto y definición

El protocolo 6LoWPAN es un estándar que busca optimizar el uso del protocolo IEEE 802.15.4 en una red de sensores de bajo consumo energético haciendo uso de IPv6 para lograr dicho objetivo. Es importante tener en cuenta que para poder aprovechar lo mencionado la compatibilidad de ambos viene dada por lo que se describe a continuación.

2.3.2. Arquitectura de una red con 6LoWPAN

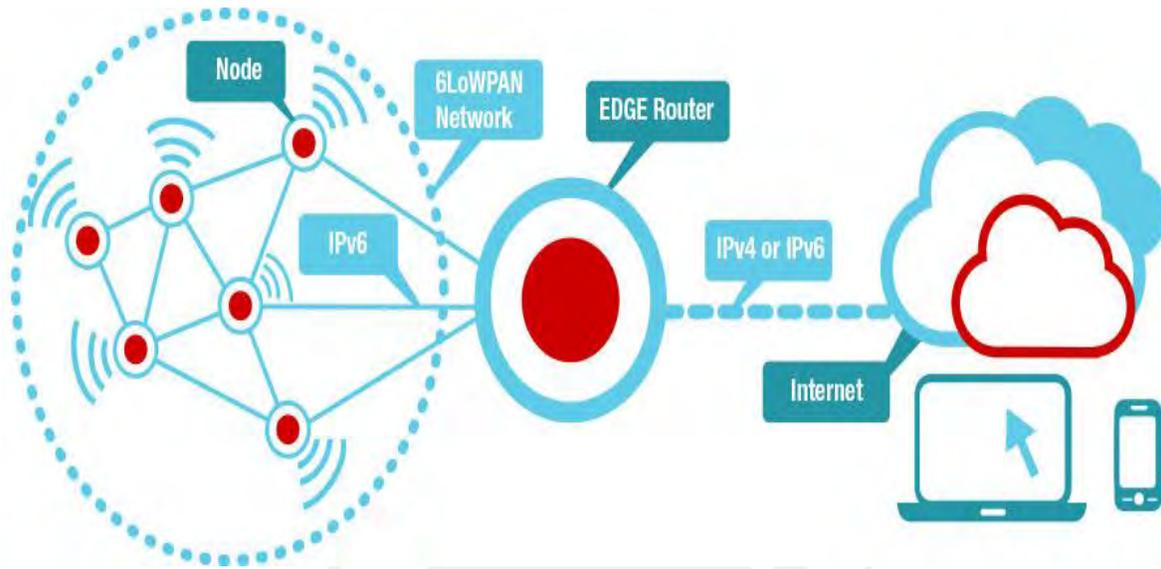


Figura 2.6. Diagrama 6LoWPAN [8]

En el diagrama ilustrado por la figura 2.6, se puede apreciar una red usando el estándar 6LoWPAN en una topología tipo mesh. Esta red es conectada a la red IPv6 usando un router de frontera, el cual cumple las siguientes funciones.

1. Intercambio de información entre los dispositivos que pertenecen a la red 6LoWPAN e internet.
2. Intercambio de data local dentro de la red 6LoWPAN
3. Generación y mantenimiento de la subred(red 6LoWPAN)

2.3.3. Pila del estándar

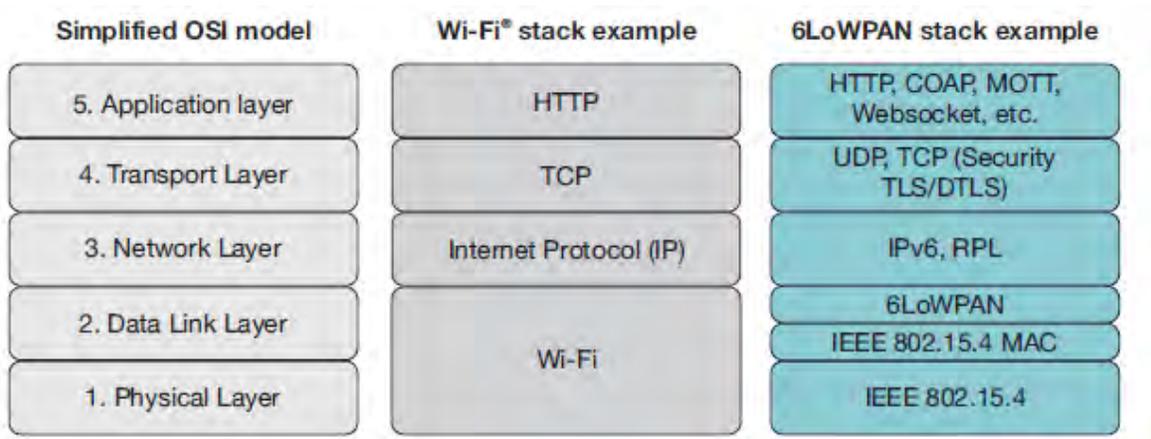


Figura 2.7. Comparación de pila de Wi-Fi y 6LoWPAN [8]

Se puede ver en la figura 2.7, como haciendo uso del modelo simplificado de la pila OSI, se compara la tecnología Wi-Fi con la planteada 6LoWPAN. La capa física corresponde al protocolo mencionado IEEE 802.15.4. y la capa de enlace de datos al protocolo IEEE 802.15.4 en su control de acceso al medio (MAC) y propiamente 6LoWPAN. También se puede ver que en el la capa de red se emplea IPv6.

Cabe recalcar que en este modelo simplificado la capa de transporte absorbe a la mencionada capa de sesión y la capa de aplicación a la de presentación

2.3.4. IPv6 en 6LoWPAN

Sobre 6LowPAN se puede implementar el protocolo de internet versión 4 y versión 6. En primer lugar, las redes LoWPAN se caracterizan por estar constituidas por numerosos dispositivos, donde cada uno de ellos cuenta con su propia dirección IP para así poder formar parte de Internet de las cosas. Sin embargo, hace unos años se pudo notar que el número de dispositivos dado por IPv4 estaba por llegar al límite y es por ello que en la nueva versión del protocolo IPv6 se superó ampliamente dicho problema.

Para que esta combinación sea posible se hace uso de la característica de autoconfiguración que posee IPv6, la cual ha sido mencionada previamente y se considera de suma importancia la interconexión de estas características.

2.4. Topología de redes tipo mesh

2.4.1. Definición y características

Empleando la topología tipo Mesh en una red se garantiza que la red sea fiable y robusta. Esto sucede dado que en esta topología los nodos se comunican directamente entre sí, en lugar de ir todos directamente a un nodo coordinador como en la topología tipo estrella bajo la cual se establecen algunas redes conocidas como Wi-Fi, donde al perder un *access point* se pierde toda la información del área. En una red de topología tipo Mesh cada nodo además de enviar su propia información, retransmite la del otro, teniendo así las siguientes características.

- Self Healing. - Cada vez que suceda un evento no esperado y un nodo desaparezca de la red, la red inalámbrica automáticamente buscará otro camino mediante otros nodos para llevar la información al gateway.
- Adaptativa. - No hay mayor dificultad cuando se realizan edificaciones cerca una vez instalada la red, dado que se adapta a las condiciones del ambiente evitando la interferencia en la comunicación y asegurando la data transmitida.
- Bajo costo. - Al emplear esta topología se eliminan los equipos que se encargan de repetir la señal dado que los mismos nodos cumplen esta función, lo cual reduce costos de instalación.
- Elimina el uso de antenas en torres y postes. - En una red de topología tipo estrella, mientras mayor sea la distancia de la aplicación para la transmisión de datos, se necesitará una mayor potencia en la señal y por ende el número de antenas en el área será mayor. De repetirse este proceso, la cantidad de antenas crecerá hasta lograr cubrir toda el área trayendo consigo problemas de consumo energético y radiación. Al plantear la topología Mesh en una red se elimina este aspecto negativo dado que se colocan más nodos que transmiten el mensaje hasta llegar a su destino sin necesidad de construir torres para colocar antenas.
- Flexible. - Es flexible puesto que no hay un factor externo que limite la cantidad de dispositivos a conformar la red, el límite lo pone la aplicación a realizar.

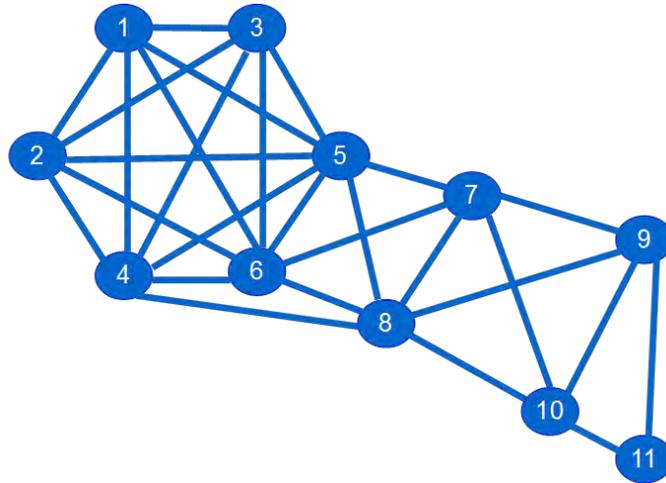


Figura 2.8. Topología tipo mesh

De la figura 2.8, se puede observar como todos los nodos están unidos conociendo toda información que circula en la red. Las características previamente descritas señalan como la información se retransmite por toda la red hasta llegar a su destino sin riesgo de pérdida de la misma.

2.5 Software y hardware

2.5.1. Contiki OS

Contiki es un sistema operativo de código abierto el cuál implementa 6LoWPAN de tal manera que optimiza el diseño de una red de sensores utilizando este estándar.

Dentro de sus principales ventajas resaltan las siguientes:

- Multitarea
- Proto-hilos
- Conectividad TCP/IP
- Paralelismo

Es importante resaltar que Contiki está basado en lenguaje de programación C y está diseñado para sistemas de escasa memoria, lo cual cumple el requisito de la red de sensores que se está diseñando pues al retransmitir los datos continuamente en

topología mesh, no es necesario que cada nodo almacene la información en su propia memoria.

2.5.2. Simulador Cooja

Es una de las herramientas que posee Contiki y la que se está empleando para el diseño de esta red de sensores utilizando 6LoWPAN. El interfaz es muy didáctico pues no solo permite diseñar la red con programación sino que se puede ver el alcance que tienen los nodos al momento de transmitir información y sus características. En complemento, cuenta con la posibilidad de analizar la comunicación en cada nodo y ver como se desarrolla en toda la red. De esta manera, se podrá ver concretamente la retransmisión que hara cada nodo al estar interconectado en topología tipo mesh.

Este simulador es de gran utilidad para esta red de sensores pues permite re ubicar constantemente los nodos para encontrar la óptima configuración respetando todos los conceptos que se han mencionado sobre los cuales se está diseñando esta red de sensores. En la figura 2.9 se puede apreciar este simulador empleado para una red de prueba.

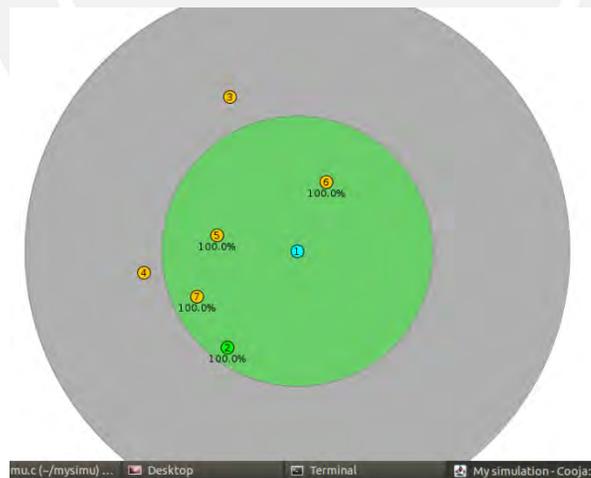


Figura 2.9. Simulación Cooja

2.5.3. TmoteSky

Catalogado como un módulo inalámbrico de muy bajo consumo energético, usado en redes de sensores y aplicaciones de monitoreo en general.

Presenta las siguientes características extraídas de su hoja de datos.

- 250kbps 2.4GHz IEEE 802.15.4 Chipcon Wireless Transceiver
- Interoperabilidad con otros dispositivos que utilicen el protocolo IEEE 802.15.4
- Microcontrolador MSP430 8MHz de Texas Instruments (10k RAM, 48k Flash)
- ADC, DAC, regulador de alimentación de voltaje y controlador DMA integrados
- antena integrada en la tarjeta con 50m. de rango en un espacio cerrado / 125m. de rango en espacio abierto.
- Sensores de temperatura, humedad y luz integrados.
- Muy bajo consumo de corriente
- Reacción rápida tras reposo ($<6\mu\text{s}$)
- Hardware link-layer encriptación y autenticación
- Programación y adquisición de data via USB
- expansión de respaldo 16 pines y opcional conector de antena SMA
- Respaldo TinyOS : mesh networking y comunicación.

Por lo descrito, se concluye que el Tmote Sky es un módulo adecuado para validar la red de sensores inalámbrica y ser el hardware de cada nodo ya que los sensores que presenta así como su interacción con el protocolo IEEE 802.15.4.

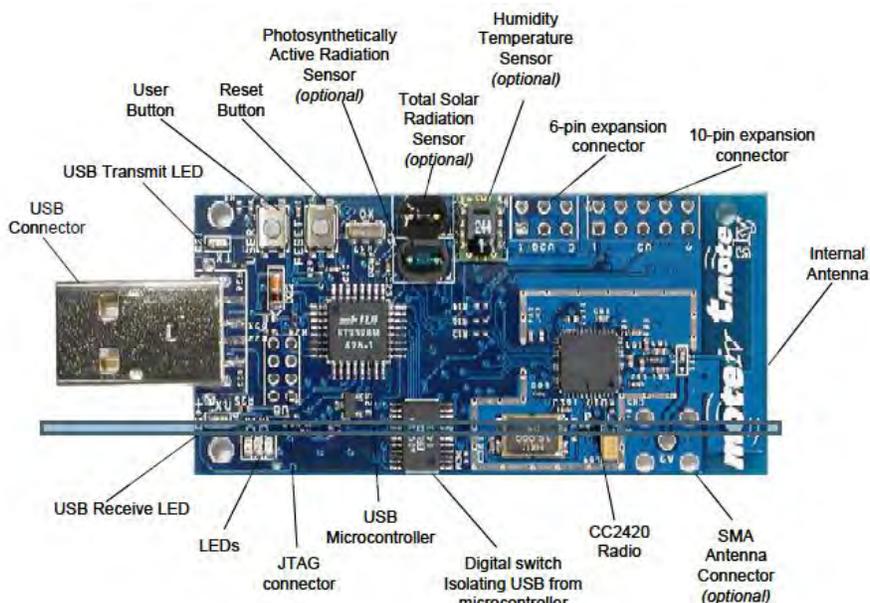


Figura 2.10. Tmote Sky [9]

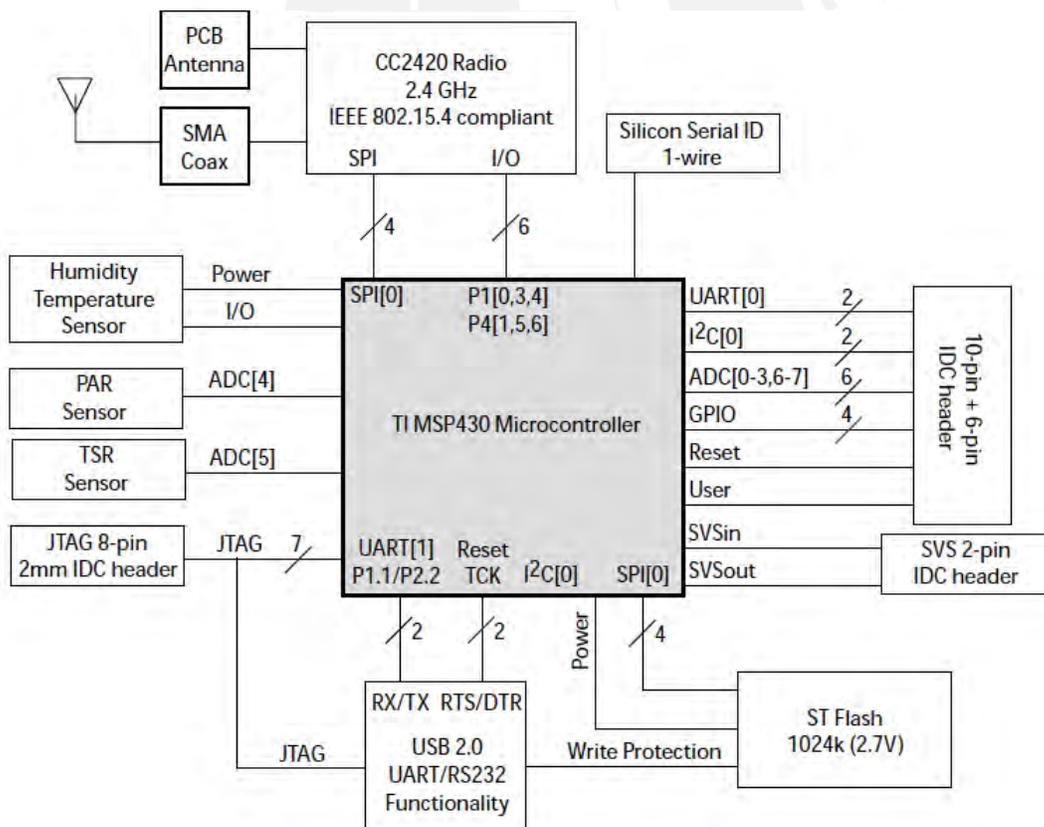


Figura 2.11. Diagrama de bloques del Tmote Sky [9]

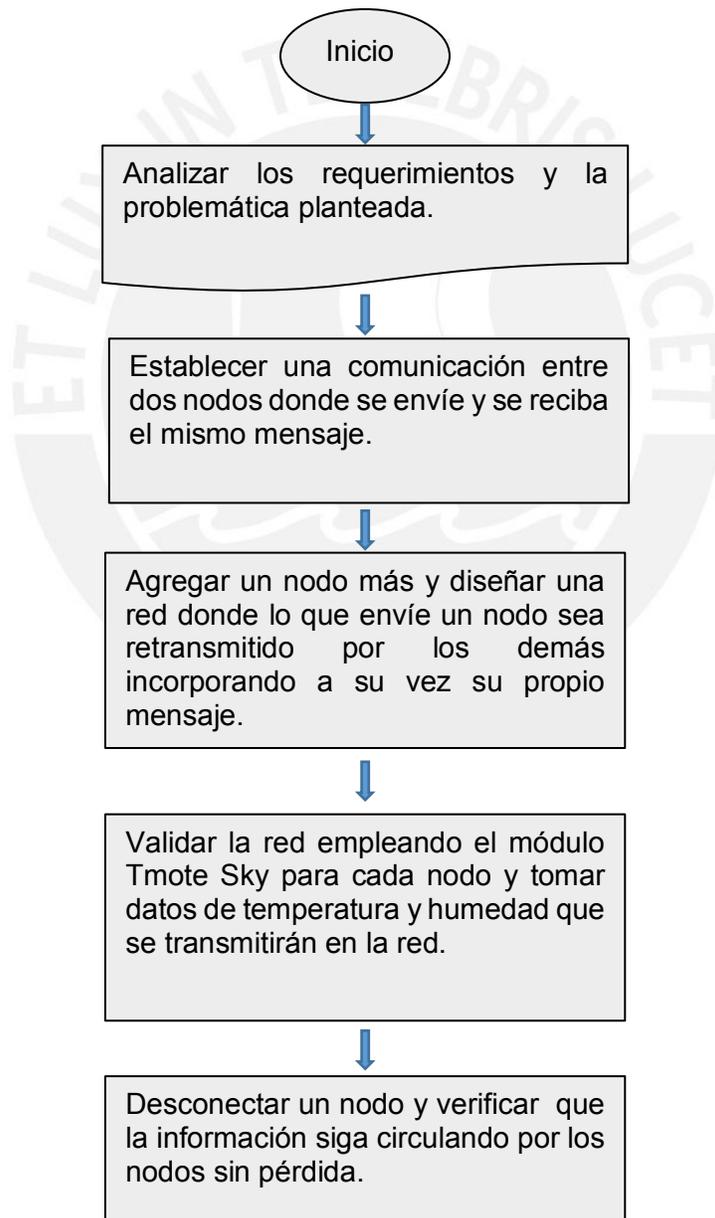
En base a lo descrito en la figura 2.10 y 2.11, se ve que existe el fundamento teórico para dar solución al problema. En el siguiente capítulo se observará la planificación del diseño de la red de sensores utilizando 6LoWPAN y cómo se validará la red para poder determinar que la red es de topología tipo mesh y que la información que está circulando es conocida por los nodos de la red en todo momento, además de tener la capacidad de incorporar nuevos nodos a la misma y las demás características que se han revisado de topología mesh, protocolo IEEE 802.15.4 e IPv6.



Capítulo 3

Diseño de la red de sensores para medir variables ambientales con 6LoWPAN

A continuación, se puede apreciar la planificación estructurada en un diagrama de flujo vertical



3.1. Diseño de la red en topología mesh

Como se ha descrito en los capítulos previos, es fundamental emplear una red de sensores en topología tipo mesh para garantizar que no exista pérdida de datos y que se asemeje lo más posible a un funcionamiento en tiempo real. Para ello, es necesario definir ciertos aspectos que han sido tomados en cuenta para el diseño de esta red empleando 6LoWPAN en la topología dada.

3.1.1. Delimitación del área

Para elegir el área donde se realizaron las pruebas de la red diseñada, se tomó en cuenta la necesidad de la aplicación. Por ello, se consideró el Colegio Parroquial San Norberto ubicado en el distrito de La Victoria en Lima. El colegio necesitaba conocer la temperatura, humedad e intensidad luminosa que llega a los salones de clases y en el patio de recreo, con el fin de poder dar las mejores condiciones para los alumnos. Para el patio, se delimitó un área de 30 metros por 30 metros en el interior del colegio, cuya ubicación exacta se puede apreciar en la figura 3.1. Para los salones se hizo uso de dos sensores por salón, en los diferentes pisos del colegio para realizar las pruebas. Es importante precisar que esta es una problemática agregada que se resuelve al aplicar esta tesis, ya que si bien es cierto la importancia de la tesis busca comprobar la robustez de la red y radica en las características de la red empleando 6LoWPAN, se realizaron las pruebas en una aplicación que es necesaria para el bien común en un ambiente que aporte a los demás, en este caso, en un colegio porque es necesario un espacio en un terreno físico para comprobar el envío de datos. Al comprobar su fiabilidad, la red puede ser orientada hacia diversas aplicaciones, ya que no esta delimitada a la aplicación.

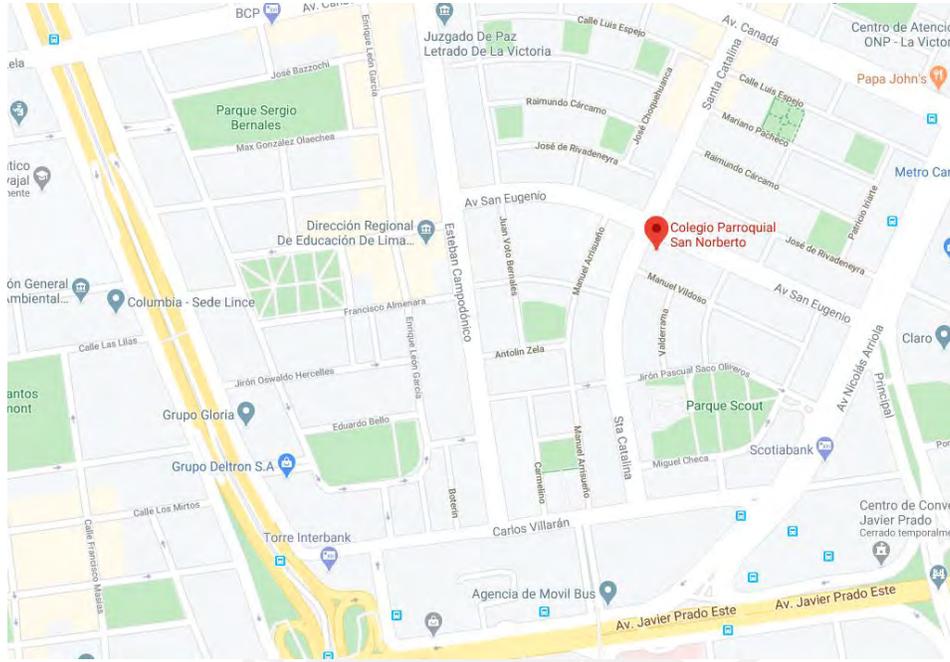


Figura 3.1. Lugar de prueba situado en el Colegio San Norberto

3.1.2. Simulador Cooja

Empleando el simulador Cooja descrito en el marco teórico, se ha diseñado la red de sensores inalámbrica respetando la distancia que existirá en la realidad. Es con esta simulación que se ha podido ver el tráfico de datos, como se entregan y reciben los paquetes, y se ha podido lograr que la comunicación sea del tipo mesh, de tal manera que se logre tener los datos reenviados a lo largo de toda la red y lograr así una interconexión de datos que permita que no exista riesgo de pérdidas de datos.

Se han realizado diversos diseños y simulaciones de redes tipo mesh, pero se requiere que sea de ultra bajo consumo de energía y que se envíe la información por el protocolo IEEE 802.15.4. Se hace uso de este simulador debido a que permite la interconexión de diversas aplicaciones y características que son necesarias para la red de sensores inalámbrica tal cual se ha planteado.

En la figura 3.2 se puede apreciar la red inicial que se ha diseñado para este trabajo de tesis.

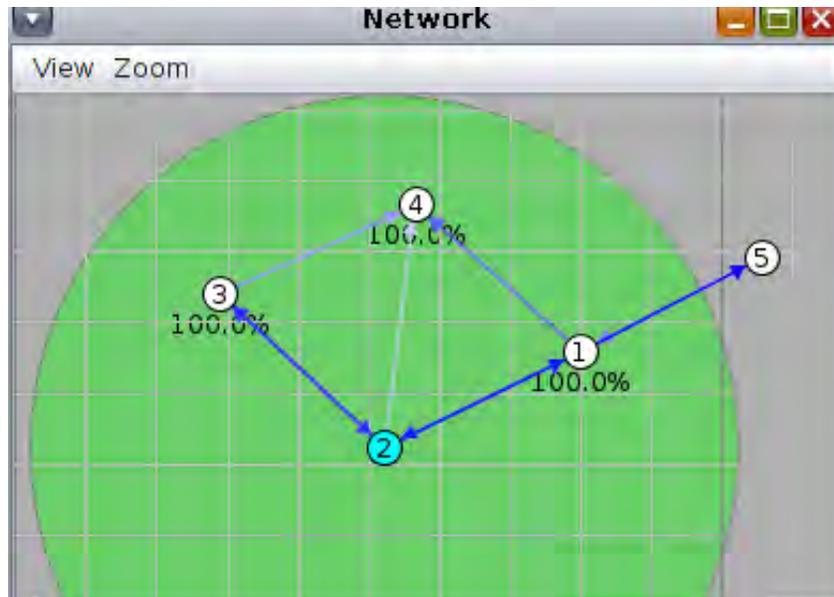


Figura 3.2. Red de sensores tipo mesh

3.2. Algoritmo y software en Contiki OS

Para poder realizar el diseño de la red de sensores en topología tipo mesh empleando 6LoWPAN, ha sido necesario programar cada nodo empleando Contiki OS en Linux, donde mediante Scripts y Shells se ha podido generar el comportamiento de interconexión de datos y reenvío de estos para tener la información de paquetes completa en cada nodo.

Se determinó que para generar el comportamiento completo de lo que busca la tesis se podía separar en tres módulos que al unirlos dieron como resultado la red de sensores empleando 6LoWPAN.

3.2.1. Adquisición de data

Para adquirir la data haciendo uso de los sensores de temperatura y humedad se necesitó realizar un código en el sistema operativo descrito para almacenar los datos en el microcontrolador y prepararlos para su envío. Como se ha explicado previamente, Contiki OS es la mejor opción para esta red, pues funciona en sistemas de escasa memoria donde la prioridad es tomar la data y enviarla sin necesidad de almacenarla de manera constante. A eso se le suma que los nodos son de ultra bajo consumo energético y tienen

la característica de ser “sleepy”, por lo que se encienden para realizar su tarea y regresan a un estado de descanso.

A continuación, en la figura 3.3 se puede apreciar el algoritmo realizado para esta tarea descrita previamente.

```
PROCESS(sensor_acq_process, "Sensor tesis");
AUTOSTART_PROCESSES(&sensor_acq_process);

PROCESS_THREAD(sensor_acq_process, ev, data)
{
    static struct etimer et;
    static int val;
    static float s = 0;
    static int dec;
    static float frac;

    PROCESS_BEGIN();

    printf("Empezando sensores.\n");

    while(1)
    {
        etimer_set(&et, CLOCK_SECOND * 2);
        SENSORS_ACTIVATE(light_sensor);
        SENSORS_ACTIVATE(sht11_sensor);

        PROCESS_WAIT_EVENT_UNTIL(etimer_expired(&et));

        val = sht11_sensor.value(SHT11_SENSOR_TEMP);
        if(val != -1)
        {
            s = ((0.01*val) - 39.60);
            dec = s;
            frac = s - dec;
            printf("\nTemperature=%d.%02u C (%d)\n", dec, (unsigned int)(frac * 100),val);
        }

        val=sht11_sensor.value(SHT11_SENSOR_HUMIDITY);
        if(val != -1)
        {
            s = (((0.0405*val) - 4) + ((-2.8 * 0.000001)*(pow(val,2))));
            dec = s;
            frac = s - dec;
            printf("Humidity=%d.%02u %% (%d)\n", dec, (unsigned int)(frac * 100),val);
        }
    }
}
```

Figura 3.3. Algoritmo de toma de datos

3.2.2. Comunicación entre nodos mediante IPv6

Para enviar los datos a lo largo de toda la red donde los nodos se encargan de hacer hops se tuvo que programar que los nodos envíen un mensaje a los nodos vecinos y si obtienen respuesta de una red disponible se conectan a la red aprovechando la característica de IPv6 de auto routeo y así lograr lo requerido.

Es por ello que en la figura 3.4 se puede apreciar el algoritmo diseñado para cumplir la comunicación multicast y que permite la adaptación de la red mesh.

```
PROCESS_THREAD(broadcast_process, ev, data)
{
    static struct etimer et;
    static uint8_t seqno;
    struct broadcast_message msg;

    PROCESS_EXITHANDLER(broadcast_close(&broadcast));

    PROCESS_BEGIN();

    broadcast_open(&broadcast, 129, &broadcast_call);

    while(1) {

        /* Send a broadcast every 16 - 32 seconds */
        etimer_set(&et, CLOCK_SECOND * 16 + random_rand() % (CLOCK_SECOND * 16));

        PROCESS_WAIT_EVENT_UNTIL(etimer_expired(&et));

        msg.seqno = seqno;
        packetbuf_copyfrom(&msg, sizeof(struct broadcast_message));
        broadcast_send(&broadcast);
    }
}
```

Figura 3.4. Porción de código para envío de data

Para enviar la data en la red mesh se hace uso de IPv6 y todas las características que han sido mencionadas en el capítulo previo. Se ha considerado que cada nodo envíe información a todos los nodos que se encuentren cerca de su rango, así como a nuevos nodos que se incorporen a la red y en caso un nodo se desconecte, automáticamente se busque otra ruta de envío de los paquetes.

3.3. Tmote Sky y su aplicación

Para implementar cada nodo simulado en físico y validar la red de sensores inalámbrica, se evaluaron las mejores opciones disponibles según lo investigado previamente en el estado del arte. En primer lugar, se contempló la idea de implementar nodos “NITOS”, desarrollados por XBee, cuyo modelo se muestra en la figura 3.5 y es compatible con el protocolo Zigbee. Sin embargo, se descartó por los siguientes motivos.



Figura 3.5. Nodo NITOS XBee [9]

Debido a que se encuentra vinculado a Zigbee, no permite la libertad requerida en las capas de comunicación necesarias mencionadas en el capítulo 2 para aplicar el protocolo 6LoWPAN sin ejecutar un protocolo privado en particular. En segundo lugar, si bien estos nodos también cuentan con sensores integrados de temperatura, humedad e intensidad luminosa, su precisión es menor que la que se describirá en los nodos Tmote sky. Esto se puede apreciar en la tabla 3.1. mostrada a continuación donde se ve la precisión de medición de temperatura y humedad de los nodos desarrollados por XBee.

En comparación a la precisión que brindan los sensores de humedad ambiental y temperatura que se encuentran en el nodo Tmote Sky, los sensores de este nodo NITOS son menos precisos y no aseguran que los valores medidos sean los correctos.

Tabla 3.1. Rangos de trabajo y operación de los sensores del NITOS XBee [9]

Model	Typ. Humidity Accuracy %RH	Typ. Temperature °C	Supply Voltage Range V	Interface
SHT10	±4.5	±0.5	2.4 to 5.5	Digital Sbus
SHT11	±3	±0.4	2.4 to 5.5	Digital Sbus
SHT15	±2	±0.3	2.4 to 5.5	Digital Sbus

Por lo descrito, se hace uso de los nodos Tmote Sky, que se caracterizan por ser de ultra bajo consumo de energía, así como su escasa memoria que le permite ser la solución ideal ante aplicaciones genéricas que necesiten funcionar de manera constante. A continuación, se muestra el nodo tmote sky y la distribución de sensores y puertos.

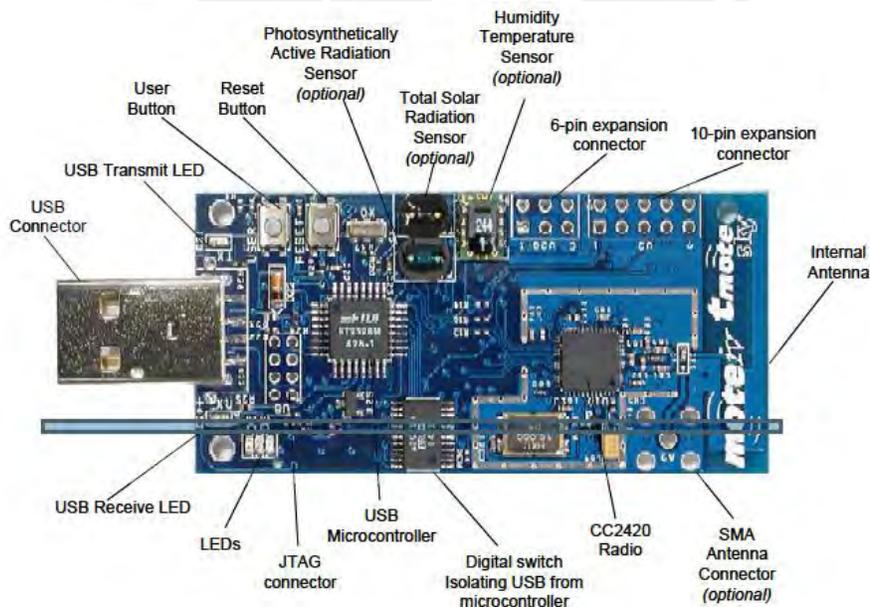


Figura 3.6. Nodo Tmote Sky [9]

3.3.1. Potencia de transmisión de la señal

En la hoja de datos del Tmote Sky se puede apreciar el espectro de la señal a la salida para el envío y se puede apreciar que opera a 2.4GHz que es la frecuencia permitida en Perú para operar y llega a 10dBm. En la figura 3.7 que se muestra a continuación se puede apreciar lo descrito.

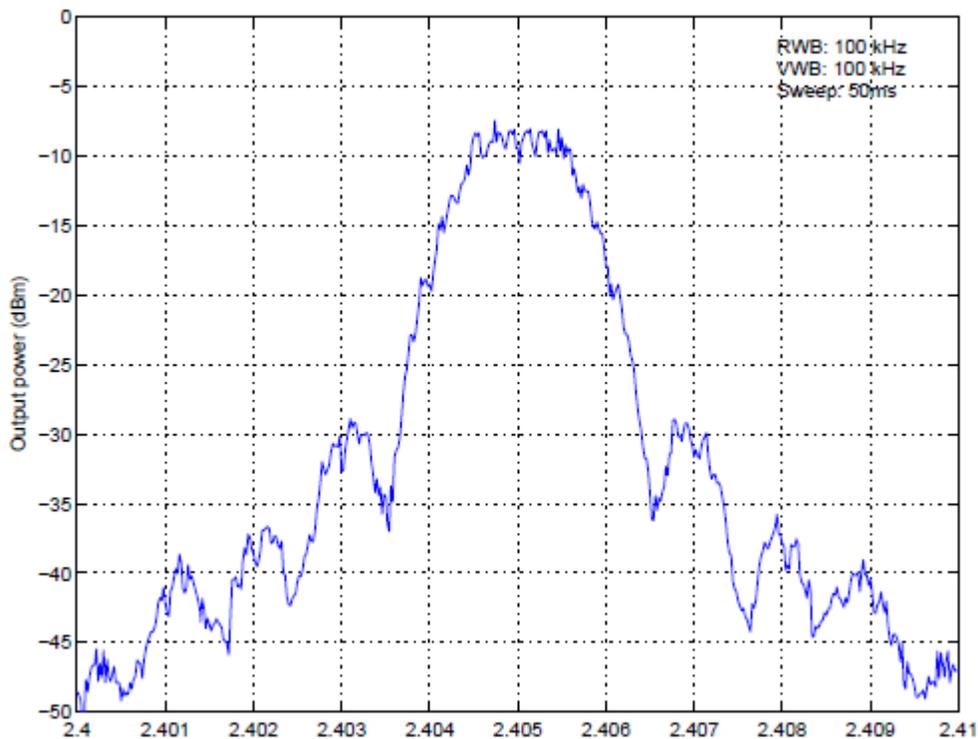


Figura 3.7. Potencia de la señal a la salida del nodo [9]

3.3.2. Componentes del nodo: microcontrolador, sensores y RF

Se escogió este nodo debido a lo mencionado y el microcontrolador MSP430 fabricado por TI fue especialmente diseñado para redes de sensores inalámbricas, por lo que permite fácilmente la interconexión de las características, así como la interoperabilidad de diversos sistemas operativos como Contiki OS, lo cual lo hace la opción perfecta para el diseño de la red de sensores inalámbrica.

Los sensores a usar son los que vienen integrados en el nodo que son el SHT11/SHT15, con muy buenas características son sin duda la mejor opción para tomar muestras de temperatura y humedad y enviarlas a lo largo de la red. Como se ha visto anteriormente, presentan características que hacen de este nodo la opción elegida para la red.

En la tabla 3.2 a continuación se puede observar las características más importantes de los sensores, así como sus graficas de cómo responden a sus respectivas variables, ya sea humedad relativa o temperatura.

Tabla 3.2. Rangos de trabajo y operación de los sensores del Tmote Sky [9]

Parameter	MIN	TYP	MAX	Units
Humidity				
Resolution	0.5	0.03	0.03	%RH
	8	12	12	Bit
Repeatability		±0.1		%RH
Range	0		100	%RH
Temperature				
Resolution	0.04	0.01	0.01	°C
	0.07	0.02	0.02	°F
	12	14	14	bit
Repeatability		±0.1		°C
		±0.2		°F
Range	-40		123.8	°C
	-40		254.9	°F

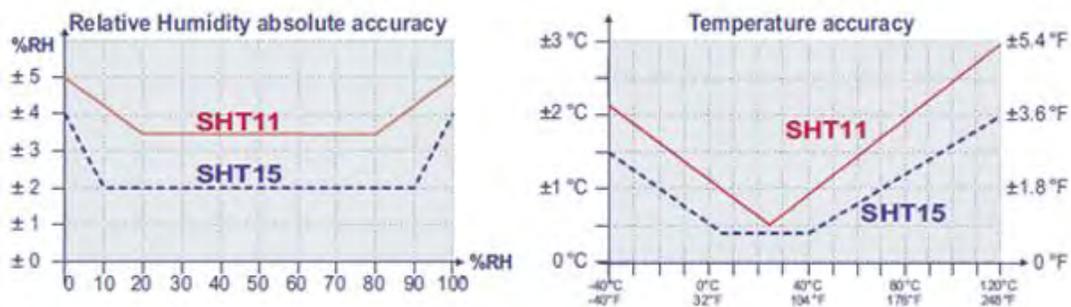


Figura 3.8 Curvas de los sensores incorporados [9]

En estas curvas mostradas en la figura 3.8 se puede apreciar el comportamiento de los sensores integrados en el nodo Tmote Sky.

CAPÍTULO 4

Resultados y validación

4.1. Robustez y fiabilidad de la red

El objetivo de esta tesis era poder comprobar que la red de sensores inalámbrica sea robusta y fiable de tal manera que sobre ella se puedan ejecutar diferentes aplicaciones y que sea considerada una alternativa de solución para los diversos proyectos que necesitan cualidades de tiempo real, así como un margen de fallo muy pequeño. Por ello, el resultado correspondiente a este objetivo está cimentado en el progreso en cuanto a investigación, así como su validación en hardware.

Se ha podido determinar que la red diseñada en topología tipo mesh cumple con las características y requisitos planteados como nivel de interconexión necesario entre nodos al momento de enviar la data y tener la certeza que la información que circula por la red se mantenga a salvo de posibles daños y situaciones adversas.

4.1.1. Tiempo real

Se ha logrado verificar que esta red de sensores inalámbrica se acerca bastante al tiempo real dado que solo necesita 0.5 segundos aproximadamente para mostrar los datos en el servidor y que de esta manera se pueda conocer a lo largo del tiempo como varían los valores de temperatura y humedad, así como otros parámetros importantes para mantener el concepto de una red de ultra bajo consumo de energía, que como se ha mencionado es un punto de partida para poder pensar en soluciones a problemas futuros que se resuelvan al aplicar esta red con esta topología.

Como se puede apreciar en la figura 1, se observa el tiempo que demora en visualizarse la data en el servidor y asimismo de ocurrir un cambio brusco en alguno de los parámetros de los cuales se toman muestras, se puede visualizar este cambio en las barras que representan las magnitudes de cada parámetro.

4.1.2. Adaptabilidad

Esta WSN además de cumplir su labor de tomar muestras de variables ambientales y mostrar dichos valores, presenta un gran nivel de interconexión entre los nodos por tratarse de una red tipo mesh, con ello una de las principales ventajas teóricas que trae consigo es la adaptabilidad. Es decir, el poder modificar la circulación de la información si se realiza alguna construcción o se sitúa algún obstáculo que obstruya el libre tráfico de data. Se ha logrado comprobar que sin importar el terreno donde se distribuyan los nodos, ya que se realizó mediciones en los jardines exteriores al pabellón O y en el Colegio Parroquial San Norberto, ubicado en la urbanización Santa Catalina, en el distrito de la Victoria y aunque se mantuvo la misma distancia de 15m. Entre nodos, las condiciones y obstáculos existentes fueron diferentes pero la red se adaptó a las condiciones externas



Figura 4.1. Área de prueba 1



Figura 4.2. Área de prueba 2

En las figuras 4.1 y 4.2 se puede apreciar las dos áreas de prueba donde se validó la red de sensores inalámbrica.

4.1.3. Rendimiento eficaz

Para poder definir un rendimiento eficaz, se hace una comparativa entre el valor teórico y una extrapolación de lo hallado empíricamente. Se sabe por la hoja de datos del tmote sky que las pilas que lo energizan pueden durar 2 o 3 años sin cambiarse ya que el nodo es de ultra bajo consumo y solo se enciende para tomar muestras de la data y luego entra a un modo sleepy. Teniendo este valor como premisa se puede apreciar en la figura 1 que el consumo es realmente mínimo.

A continuación, en la figura 4.3 se muestra el consumo de energía promedio de los dos nodos que no se encontraban como Gateway y funcionando con 2 pilas AA, se puede apreciar que el consumo es de 1.4mW, lo cual valida que sea de ultra bajo consumo energético.

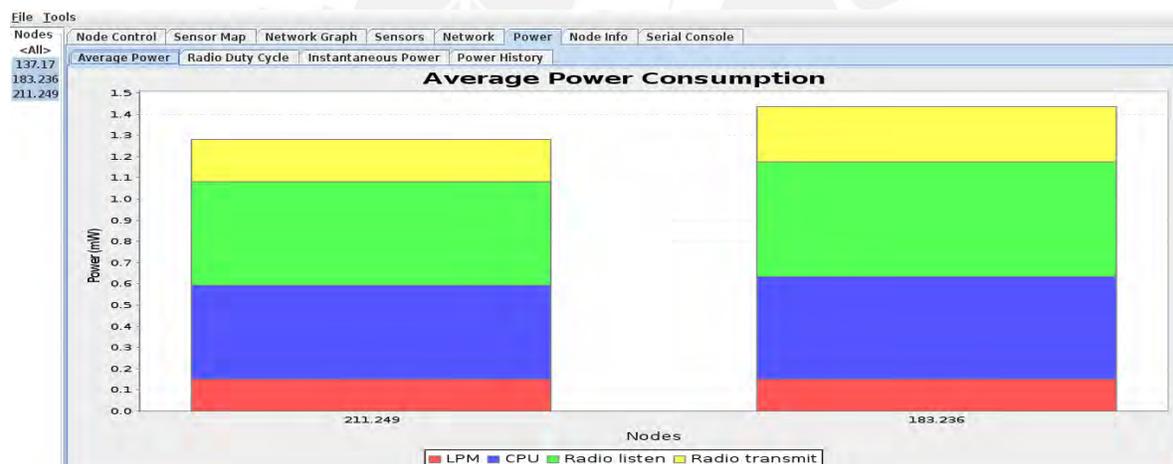


Figura 4.3. Potencia en los nodos

4.2. Ventajas de emplear topología mesh en 6LoWPAN

A lo largo de los capítulos previos, se han definido las ventajas teóricas de diseñar una red de sensores inalámbrica en topología tipo mesh para una red en 6LoWPAN y en la práctica se ha podido comprobar lo significativo que es que todos los datos estén interconectados y que si un nodo se cae de la red, de igual forma la información pueda circular manteniendo su integridad y el rango que cubre la red.

4.2.1. Adoptar un nodo

Para potenciar esta característica nativa de IPv6 se realizó un algoritmo donde un nodo que se quiera insertar en una red de sensores ya existente envíe un paquete de disponibilidad al nodo vecino más cercano, donde este nodo enviará la respuesta de si pertenece a alguna red y la disponibilidad de la misma, y de existir disponibilidad mediante auto-routing se añade el nodo a la red. Este resultado se ha validado empleando el módulo Tmote Sky.

4.2.2. Eliminar un nodo

Es una característica importante poder prescindir de un nodo en la red tipo mesh para 6LoWPAN, dado que de caer el nodo se requiere que la red no quede dividida, sino que automáticamente se evite enviar la información a este nodo pues ya no existe y se haga un puente sobre él. Se ha comprobado realizando una red con 4 Tmote Sky y al apagar uno se observó que los otros nodos mantienen la característica de conocer la información de los nodos vecinos

4.2.3. Envío de la información en la red

El envío de la red se efectuó empleando IPv6 para mayor seguridad de la información, así como para permitir mayor conexión de diversos nodos y dispositivos. Para esta red de sensores inalámbrica la información se realizó sin presentar ningún problema dado que se logra visualizar el estado de todos los nodos, la información que cada uno recolecta y los nodos vecinos.

A continuación en la figura 4.4. se puede ver una porción del código implemento para lograr el envío de data en la red.

```
PROCESS_THREAD(broadcast_process, ev, data)
{
    static struct etimer et;
    static uint8_t seqno;
    struct broadcast_message msg;

    PROCESS_EXITHANDLER(broadcast_close(&broadcast));

    PROCESS_BEGIN();

    broadcast_open(&broadcast, 129, &broadcast_call);

    while(1) {

        /* Send a broadcast every 16 - 32 seconds */
        etimer_set(&et, CLOCK_SECOND * 16 + random_rand() % (CLOCK_SECOND * 16));

        PROCESS_WAIT_EVENT_UNTIL(etimer_expired(&et));

        msg.seqno = seqno;
        packetbuf_copyfrom(&msg, sizeof(struct broadcast_message));
        broadcast_send(&broadcast);
    }
}
```

Figura 4.4. Porción de algoritmo para envío de data en la red

4.3. Resultados respecto a la adquisición de data

Los resultados presentados a continuación, permiten saber que la tesis cumple su objetivo principal que es el de tomar muestras de variables ambientales en topología tipo mesh. Además, se puede apreciar que los valores que aparecen en las figuras 4.5 , 4.6 y 4.7 son valores reales ya que los sensores que están incorporados en los nodos han sido previamente calibrados y los parámetros climatológicos han sido previamente calculados con otros sensores del laboratorio de IoT PUCP para poder contrastar los valores y así comprobar que lo hallado es preciso.

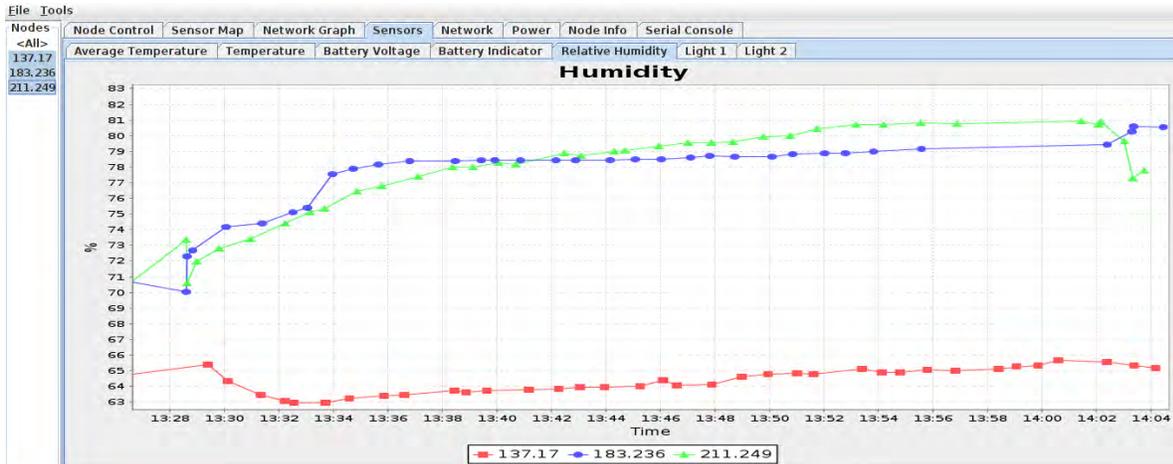


Figura 4.5 Resultados de medición de humedad.



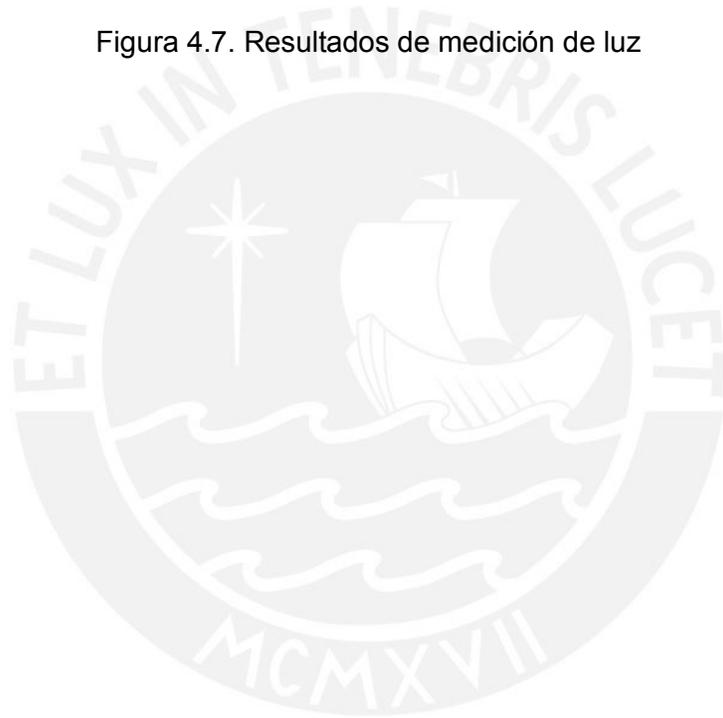
Figura 4.6. Resultados de medición de temperatura

Conocer como fluye la información y poder visualizar estas variables ambientales en las figuras 4.5 y 4.6 muestra que no hay pérdida de data y que la información está siendo retransmitida, ya que el nodo 137.17 es el que está conectado a la PC y el nodo 183.236 le envía la data que ha tomado al nodo 211.249 y éste reenvía esta información y la propia al nodo 137.17, que cumple la función de sink.

A continuación se muestra la figura 4.7 que pese a no ser un objetivo también se ha podido medir la intensidad de luz en lux.



Figura 4.7. Resultados de medición de luz



4.3.1. Algoritmo

Una porción de código del algoritmo principal esta detallado a continuación y permite que cada nodo recolecte las muestras de los parámetros climatológicos y variables internas de los Tmote Sky. Se tuvo que tener en cuenta los rangos de temperatura y humedad en Lima y más específicamente en San Miguel para calibrar estos sensores integrados en los nodos.

```
PROCESS(sensor_acq_process, "Sensor tesis");
AUTOSTART_PROCESSES(&sensor_acq_process);

PROCESS_THREAD(sensor_acq_process, ev, data)
{
    static struct etimer et;
    static int val;
    static float s = 0;
    static int dec;
    static float frac;

    PROCESS_BEGIN();

    printf("Empezando sensores.\n");

    while(1)
    {
        etimer_set(&et, CLOCK_SECOND * 2);
        SENSORS_ACTIVATE(light_sensor);
        SENSORS_ACTIVATE(sht11_sensor);

        PROCESS_WAIT_EVENT_UNTIL(etimer_expired(&et));

        val = sht11_sensor.value(SHT11_SENSOR_TEMP);
        if(val != -1)
        {
            s = ((0.01*val) - 39.60);
            dec = s;
            frac = s - dec;
            printf("\nTemperature=%d.%02u C (%d)\n", dec, (unsigned int)(frac * 100), val);
        }

        val=sht11_sensor.value(SHT11_SENSOR_HUMIDITY);
        if(val != -1)
        {
            s = (((0.0405*val) - 4) + ((-2.8 * 0.000001)*(pow(val,2))));
            dec = s;
            frac = s - dec;
            printf("Humidity=%d.%02u %% (%d)\n", dec, (unsigned int)(frac * 100), val);
        }
    }
}
```

Figura 4.8. Porción de código principal

4.3.2. Flujo de información

Se puede apreciar en la figura 4.9 y 4.10 como el flujo de la información es tal cual se presentó en la simulación en el capítulo 3, es decir en todos los sentidos y llevando la información del anterior nodo realizando saltos a lo largo de toda la red.

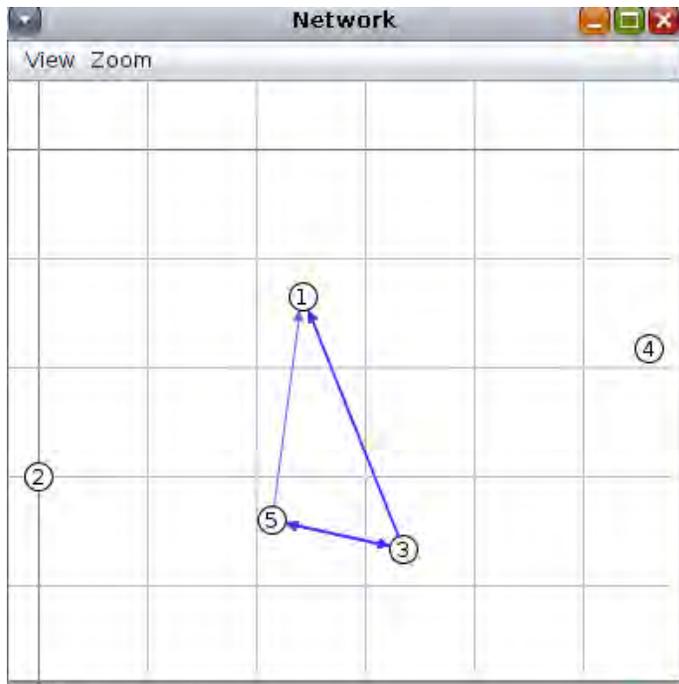


Figura 4.9. Visualización de la red

Time	From	To	Data
9363	5	[3 0]	105: 15.4 D 0012:7405:0005:0505 FFFF IPHC ICMPv6 RPL DIO AAAA0000 000000
9367	5	[3 d]	105: 15.4 D 0012:7405:0005:0505 FFFF IPHC ICMPv6 RPL DIO AAAA0000 000000

IEEE 802.15.4 DATA 1
From ABCD/0012:7405:0005:0505 to ABCD/FFFF
IPHC HC-06
tf = 3 nhc = false hlim = 2 cid = 0 sac = 0 sam = 3 MCast = 1 dac = 0 dam = 3
IPv6 ICMPv6 TC = 0 FL: 0
From FE80:0000:0000:0000:0012:7405:0005:0505 to FF02:0000:0000:0000:0000:0000:0000:001A
Type: RPL Code: DIO
InstanceID: 30 Version: 240 Rank:256 MOP: 2 DTSN: -15

Payload (72 bytes)
AAAA0000 00000000 000000FF FE000001 02060704
00020000 040E0008 0C0A0700 01000001 00FFFFFF
081E4040 00000000 00000000 00000000 AAAA0000 ..@.....
00000000 00000000 00000000

Figura 4.10. Analisis de 6LoWPAN

4.3.3. Interfaz para mostrar la data

Además de lo mostrado que ya verifica el propósito de este trabajo de tesis al lograr una red en topología mesh usando 6LoWPAN para medir variables ambientales, se elaboró un servidor/interfaz que puede apreciarse en la figura 4.11 para que el usuario pueda visualizar a un nodo y los nodos vecinos.

La interfaz para mostrar la data contó con una encuesta a cinco estudiantes de la PUCP de como preferían ver estos datos y el gráfico de barras horizontales fue la mejor interpretación.

Contiki Node 137.17

[Front page](#) **Neighbors**
[Neighbors](#)
[Sensors](#)

- [211.249](#)

Figura 4.11. Interfaz inicial



Contiki Node 211.249

[Front page](#) [Reload](#) took 0.797 seconds
[Neighbors](#)
[Sensors](#)

Environment

Temperature 25.4 °C
Humidity 60.37%



Light

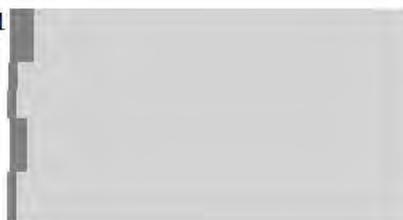
Light 1 74
Light 2 47



Figura 4.12. Medición ambiental de un nodo

Power

Power consumption 1.61 mW
CPU power 0.35 mW
LPM power 0.04 mW
Radio RX power 1.13 mW
Radio TX power 0.08 mW



0

Figura 4.13. Consumo de energía del nodo

Contiki Node 137.17

[Front page](#) [Reload](#) took 0.572 seconds

[Neighbors](#)

[Sensors](#)

Environment

Temperature 25.5 °C
Humidity 60.25%

Light

Light 1
2870
Light 2
947

Figura 4.14. Medición ambiental del nodo vecino

Power

Power consumption 1.46
mW
CPU power 0.16 mW
LPM power 0.05 mW
Radio RX power 1.24
mW
Radio TX power 0.02
mW

Figura 4.15. Consumo de energía del nodo vecino

En las figuras 4.12, 4.13, 4.14 y 4.15 se observa de otra manera lo ya graficado cuando se señaló los resultados de visualización de data. Verificando así de otro método que se logra tener acceso a todos los nodos desde cualquier nodo y que al usar 6LoWPAN se mejora la circulación de data y se puede visualizar los datos de variables ambientales, así como de consumo interno de energía, confirmando todo lo planteado.

4.4. Validación final y proyección

Haciendo uso de los diseños realizados y continuando con el procedimiento mostrado se logró generar una red de más de diez nodos. Esto fue posible debido a que con el algoritmo desarrollado y las características vistas en este documento se pueden añadir más nodos a la red cuando está en funcionamiento por adaptabilidad.

En la siguiente figura, se puede ver como los nodos están interconectados entre sí para la transmisión de datos siguiendo la topología mesh descrita previamente. Pese a que la trama de datos tiene un camino directo hacia el nodo más cercano, se aprecia que se transmite a más de un nodo por lo que se cumple con el objetivo de una red segura, realimentada, robusta y fiable ante una desconexión repentina o situación inesperada.

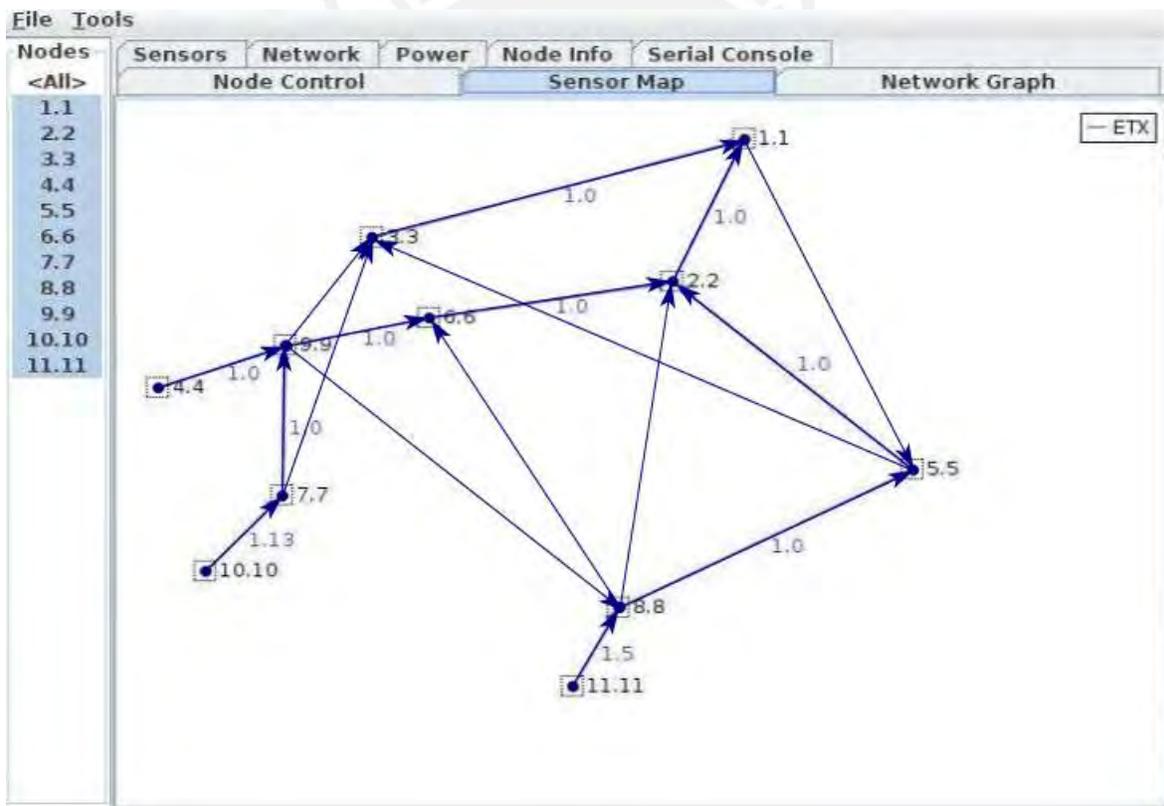


Figura 4.16. Red de once nodos

Con el interfaz desarrollado visto en los casos anteriores, se logra obtener la siguiente información que se puede visualizar en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Resultados de la red diseñada y validada para once nodos

Nodo (Etiqueta)	Dirección IP	RDC promedio (%)	Consumo promedio(mW)	Intervalo Beacon	Paquetes recibidos	Paquetes perdidos
1.1	137.17	0.87	1.46	10min 33s.	1123	14
2.2	57.39	0.83	1.12	12min 30s.	1144	38
3.3	183.236	0.85	1.41	14min 48s.	1136	30
4.4	244.64	1.01	1.38	11min 35s.	1146	12
5.5	105.63	0.92	2.43	15min 56s.	887	246
6.6	211.249	0.87	1.61	13min 16s.	679	440
7.7	38.109	0.87	1.06	17min 21s.	1098	32
8.8	113.59	0.82	2.87	12min 27s.	1121	20
9.9	64.28	0.92	1.58	15min 34s.	854	210
10.10	19.127	0.80	1.25	15min 50s.	1157	16
11.11	223.34	0.82	2.13	14min 36s.	1084	28

En esta tabla, se puede apreciar que los valores de potencia consumida de todos los nodos son similares a los encontrados en la red tipo mesh de 3 nodos. Esto nos confirma el concepto que al incrementar mas nodos idénticos y operar bajo las mismas condiciones el consumo de potencia deberá ser similar en todos los casos. Adicionalmente se brinda

información del ciclo de trabajo radial promedio en la comunicación como se puede ver en la figura 4.17, así como los paquetes recibidos y perdidos por nodo. Cabe recalcar que, al retransmitir todos los mensajes a lo largo de la red, en realidad no existe pérdida puesto que el dato transmitido hacia un nodo que se haya perdido se transmite con eficacia a otro nodo llegando así de igual forma a su destino.

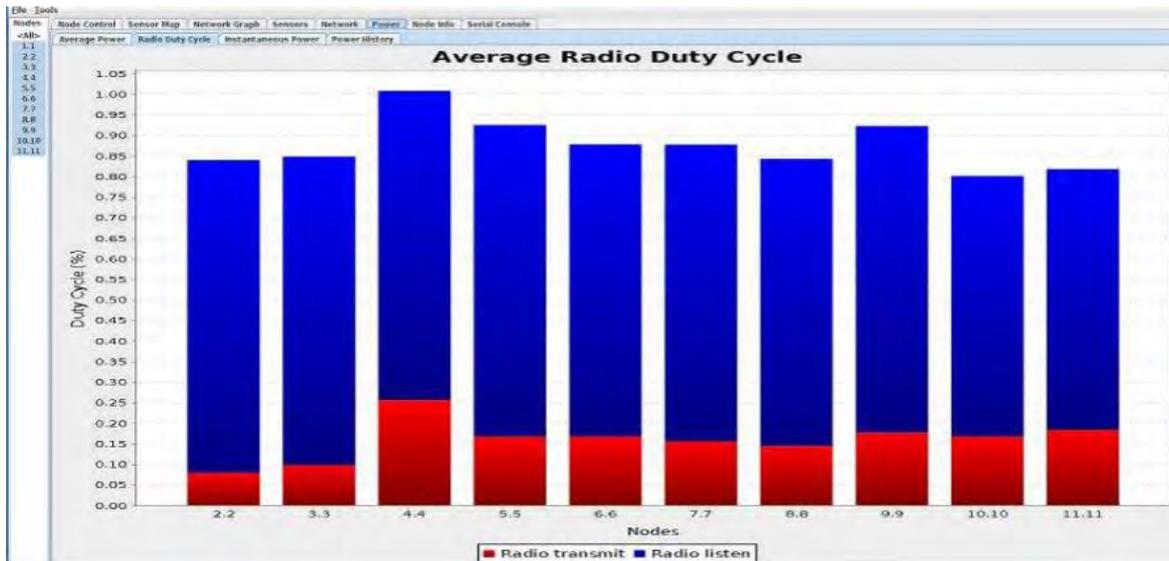


Figura 4.17. Ciclo de trabajo radial promedio

Por lo visto en este capítulo, se puede comprobar que la red es viable debido al bajo consumo energético registrado por cada nodo, así como la robustez de esta ya que todos los nodos se encuentran interconectados y ello reduce la pérdida de información. En complemento, se puede agregar que la red diseñada es eficiente ya que necesita de pocos recursos para tener un funcionamiento óptimo y generar un impacto positivo tanto en el medio ambiente, como en la investigación para futuros trabajos basados en este.

4.4.1. Costos del proyecto

La red diseñada en este trabajo de tesis es factible tecnológicamente y ello se respalda en los resultados obtenidos mostrados previamente. El costo de sensado empleando los nodos Tmote sky en la red desarrollada es de 305.85 soles por cada nodo; es decir, un costo total de 3364.35 soles. A medida que se desee expandir la red, el costo total aumentará agregando el precio unitario ya mencionado según lo encontrado en la página web de su desarrollador "TelosB". A continuación, en la tabla 4.2 se observa la proyección de costos de un proyecto de red de medición empleando 11 nodos con 6LoWPAN, el costo total sería de 11924.35 soles considerando el costo de ingeniería por el diseño y desarrollo de la red, así como la implementación de los algoritmos y la validación de la red, el costo de los nodos, el costo de la plataforma desarrollada para la presentación de los resultados, así como los costos de la infraestructura de red para almacenar y respaldar los datos, servidores comerciales cuyo costo es de 3000 soles como mínimo, soporte técnico y las licencias necesarias para un periodo de 2 años, que es el tiempo que pueden funcionar los nodos sin necesidad de reemplazar la fuente de energía, en este caso las pilas.

Tabla 4.2. Costo de la red

Elemento de la red	Precio por unidad(S/.)	Cantidad	Renovación	Total(S/.)
Nodo Tmote Sky	305.85	11.00	No	3364.35
Concentrador	150.00	1.00	No	150.00
Pilas AA	5.00	22.00	Sí	110.00
Plataforma desarrollada para la presentación de resultados	300.00		No	300.00
Infraestructura de red (Servidores, soporte y licencia de almacenamiento)	4000.00		No	4000.00
Costos de ingeniería	4000.00			4000.00
Total				11924.35

Conclusiones

1. Se ha diseñado y validado una red de sensores empleando 6LoWPAN en topología de red tipo mesh, que permite la medición de parámetros ambientales sin limitar ni condicionar el funcionamiento de la red a la aplicación. Se ha logrado determinar las características de una red aplicando 6LoWPAN para su desarrollo. De esta forma, se permite que el parámetro a evaluar sea variable ya que la señal a medir no afecta la robustez de la red, esto se ha comprobado en los resultados obtenidos que indican que la pérdida de datos es mínima en esta configuración.
2. Se verificó que la red inalámbrica de sensores puede ser configurada utilizando 6LoWPAN y aplicando el sistema operativo Contiki para la comunicación entre nodos, de esta forma se analizaron las características del protocolo y se cumplió el objetivo propuesto del uso de Contiki OS para la comunicación entre más de diez nodos. Esto no solo trae ventajas a nivel de protocolos de comunicación y seguridad en la circulación de la información, sino que también es de bajo consumo energético, lo cual la hace viable y al consolidar este concepto, en lugar de sensores de humedad y temperatura podría cambiarse la aplicación, pero mantener la estructura de la red que permite un mejor desempeño.
3. Se realizaron mediciones de temperatura, humedad ambiental e intensidad luminosa, así como pruebas en la red de conexión, desconexión, adaptabilidad, interacción entre nodos, y se obtuvo que la información recibida es confiable, es decir los mensajes enviados son recibidos correctamente. En complemento, se incrementó el número de nodos progresivamente desde tres hasta más de diez y se encontró que la red es estable y admite el aumento de nodos sin alterar su correcto funcionamiento y enriqueciendo los datos adquiridos ya que la transmisión entre nodos es mayor y el mismo mensaje salta entre los nodos por lo que a mayor cantidad de nodos, se minimiza el riesgo de pérdida en los mensajes, por lo que se concluye que se trata de una red eficiente. Por lo descrito se cumplen los objetivos de aplicar la red para tomar muestras de variables ambientales y con las pruebas realizadas se evidencia que la red es robusta, eficiente y viable.

Recomendaciones

Para trabajos futuros relacionados con la interconexión de datos y los nuevos métodos de topologías en redes, es importante tomar este trabajo de tesis como punto de partida ya que resume y verifica porque es importante el uso de 6LoWPAN en una red inalámbrica.

Además, se recomienda verificar la versión de Contiki con la cual se trabaje dado que si se intenta trabajar con versiones inferiores a la 2.5 y superiores a la 2.7 surgirán problemas de protocolo y sincronización.

Sin importar cuál sea la aplicación, se debe revisar cómo se enviará la data, dado que tener claro este concepto permite generar una topología mesh o cualquier otra que se desee implementar según la aplicación en específico. En este caso, se encontró que al usar esta topología con 6LoWPAN se logra que muchas características positivas que normalmente están dispersas converjan en una misma red.

Además, se busca incentivar el desarrollo por la investigación en sí misma, ya que existe una tendencia que desvirtúa la labor de investigación dando más importancia a la aplicación que al fundamento. Es por ello, que este trabajo busca cimentar las bases sólidas de una red de sensores aplicando topología tipo mesh empleando 6LoWPAN por primera vez en la PUCP. Al haber logrado este gran propósito se espera que los trabajos de investigación siguientes que existan no solo en el grupo de IoT-PUCP, sino que también en otras universidades puedan tomar esta tesis como base para poder tener un punto de partida nacional.

Si se desea implementar esta red en un área específica, se debe tomar en cuenta la proyección de costos realizada para elaborar el proyecto e invertir en el presupuesto dado que incluye el costo de los nodos, el trabajo por desarrollar la red y los servidores que permiten el almacenamiento sostenido de los datos.

Bibliografía

[1] N. Fahmi, S. Huda, E. Prayitno, M. U. H. A. Rasyid, M. C. Roziqin and M. U. Pamenang, "A prototype of monitoring precision agriculture system based on WSN," 2017 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA), Surabaya, 2017, pp. 323-328.

[2] R. A. Setyawan, Soeprpto, H. Suyono and R. N. Hasanah, "Low-power WSN-based solar-cell monitoring system," 2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), Bursa, 2017, pp. 1-5.

[3] O. Chieochan, A. Saokaew and E. Boonchieng, "Internet of things (IOT) for smart solar energy: A case study of the smart farm at Maejo University," 2017 International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS), Chiang Mai, 2017, pp. 262-267.

[4] N. P. Sastra and D. M. Wiharta, "Environmental monitoring as an IoT application in building smart campus of Universitas Udayana," 2016 International Conference on Smart Green Technology in Electrical and Information Systems (ICSGTEIS), Bali, 2016, pp. 85-88.7

[5] H. C. Lee and K. H. Ke, "Monitoring of Large-Area IoT Sensors Using a LoRa Wireless Mesh Network System: Design and Evaluation," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018.

[6] HINDEN, R, DEERING, S, "IP Version 6 Addressing Architecture", RFC4291, IETF, 2006.

[7] HEILE, Robert, et. Al. "Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)", IEEE Computer Society, 2006.

[8] 6LoWPAN, Texas Instrument- demystified. Disponible de manera gratuita en la página web de TI.

[9] Tmote Sky, Moteiv- datasheet. Disponible de manera gratuita en la página web de Moteiv.

