

Diseño e Implementación de una Red de Sensores Inalámbricos para el Monitoreo de Temperatura Corporal

Carlos Andrés Saavedra Arancibia ⁽¹⁾, Dennis Michael Ordoñez Riofrio ⁽²⁾, Ing. Boris Ramos PhD. ⁽³⁾
Facultad de Ingeniería de Electricidad y Computación ^{(1) (2) (3)}
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) ^{(1) (2) (3)}
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral
Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador
casaaved@espol.edu.ec ⁽¹⁾, dmordone@espol.edu.ec ⁽²⁾, bramos@espol.edu.ec ⁽³⁾

Resumen

El proyecto consiste de: la medición de la temperatura corporal de los pacientes en un hospital, crear una red mallada entre los nodos sensores de temperatura, desarrollar una interfaz al usuario que muestre las mediciones, de obtener los niveles de potencia de la señal recibida en cada nodo sensor y de usar un modelo de propagación que confirme los valores de potencia recibido para los nodos sensores y que son obtenidos experimentalmente. , usando el sensor de temperatura LM35, el Microcontrolador 12LF1822 y el OPAMP 741. Además de crear una red mallada entre los sensores, labor a cargo de los dispositivos XBee, los cuales están basados en el estándar ZigBee.

Para una implementación exitosa de este proyecto se divide en seis etapas: bloque de alimentación, encargada de energizar los componentes del nodo; bloque sensor, el integrado LM35 realiza esta labor; bloque de amplificación, a cargo del OPAMP LM741, amplifica la señal en el rango de interés; bloque de conversión analógica/digital y creación de tramas, el Microcontrolador 12LF1822 creará la trama y hará la conversión; bloque de transmisión, el dispositivo XBee enrutará la trama hacia el destino; y la interfaz realizada en LabView.

Palabras Claves: Zigbee, LabView, XCTU, XBee, API, RSSI.

Abstract

This project consists of: the measurement of body temperature of patients in a hospital, to create a mesh network between nodes temperature sensors, develop an interface to the user that shows the measurements, to get the Received Signal Strength Indicator in each sensor node and use a propagation model to confirm the values of Received Signal Strength Indicator for the sensor nodes and which are obtained experimentally, by using the temperature sensor LM35, the microcontroller 12LF1822 and the OPAMP 741. Besides creating a mesh network between sensors, work performed by devices XBee, which are based on the standard ZigBee.

For a successful implementation of this project it is divided into six stages: power supply, responsible for energize the components of the node; sensor block, the integrated LM35 carrying out this work; amplification block, in charge of OPAMP LM741; which amplifies the signal in the range of interest; block analog / digital conversion and creation of frames; transmission block, the XBee device route the frame to the destination; and interface developed in LabView

Keywords: Zigbee, LabView, XCTU, XBee, API, RSSI.

1. Introducción

El proyecto consiste en el diseño e implementación de una red de sensores inalámbricos utilizando los módulos de transmisión inalámbrica XBee, basados en el estándar ZigBee (IEEE 802.15.4), junto a microcontroladores, sensores de temperatura y rectificadores, que ayudaron en el objetivo de crear nodos sensores, capaces de monitorear la temperatura corporal y presentarla en una computadora gracias al software de desarrollo LabVIEW. El programa XCTU propiedad de la 'DIGI International Inc.' brindará la herramienta necesaria para observar la red mallada establecida y los niveles de potencia recibida en cada nodo sensor; adicional, usando el modelo de

propagación dependiente de las particiones del sitio obtendremos los valores recibidos por cada nodo sensor de manera teórica, finalmente se realizarán los cálculos de porcentajes de error, sobre los valores de potencias recibidas.

2. Generalidades

Se definen objetivos planteados y los correspondientes alcances y limitaciones del proyecto.

2.1. Objetivos

2.1.1. Objetivos Generales. El objetivo principal del proyecto es desarrollar un sistema capaz de medir

temperatura corporal, empleando una solución escalable, robusta y automatizada.

2.1.2. Objetivos Específicos. Son:

- Uso del Microcontrolador PIC 12LF1822 para crear el proceso de conversión analógica/digital sobre la señal.
- Comprender el proceso de encapsulación empleado por los dispositivos XBee al trabajar en modo API.
- Utilizar el software Labview para crear la interfaz hacia el usuario.
- Analizar el impacto de las distancias y obstáculos presentes en un camino, sobre la señal transmitida entre los dispositivos sensores.
- Implementar el proyecto y verificar su aplicabilidad en un entorno real.
- Utilizar el software XCTU, para observar cambios en la topología de la red y verificar el nivel de potencia de la señal recibida en cada nodo.

2.2. Alcance y Limitaciones del Proyecto

Entre los alcances del proyecto se tiene:

- ❖ Implementar una tarjeta electrónica para cada nodo sensor.
- ❖ Comunicación serial de los datos recibidos por el nodo coordinador hacia el computador.
- ❖ Lectura de datos de la señal de entrada en el puerto de entrada analógica del Microcontrolador, el mismo que saldrá en formato digital a través del UART.
- ❖ Usar un modelo de propagación para proyectar los niveles de potencia que debe recibir cada nodo.
- ❖ Comparar los niveles de potencia de la señal recibida en cada nodo, obtenidos teórica y experimentalmente.
- ❖ Desplegar la información de temperatura corporal de cada paciente en tiempo real.

Entre las limitaciones se tiene las siguientes:

- ❖ El uso de baterías para la energización, limita el tiempo de vida de los nodos sensores.
- ❖ La sensibilidad y la potencia de transmisión limita el uso de los dispositivos a distancia no mayores a 30 metros para soluciones indoor.

3. Marco Teórico

3.1. Red de sensores inalámbricos

Una red de sensores inalámbricos (WSN), es un conjunto de elementos que reciben el nombre de nodos, interconectados entre sí de manera inalámbrica, que colaboran con el objetivo de resolver una tarea en común.

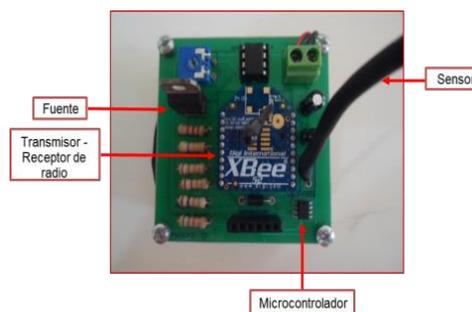


Figura 1. Partes de un nodo sensor

Cada nodo sensor que es parte de la red está formada de las siguientes partes: microcontrolador, fuente de energía, un radio tranceptor y un elemento sensor.

Las características principales de una Red de Sensores Inalámbricos son:

- Se debe considerar que el consumo energético es vital en una red de sensores inalámbricos, ya que se tiene que conjugar autonomía con capacidad de procesamiento; por esta razón se busca que el dispositivo transmisor y el microcontrolador tengan un bajo consumo de energía.
- Topología dinámica, debido a ser una red escalable, la topología siempre está cambiando, ya que los nodos son auto configurables y pueden aparecer en la red.
- Los nodos sensores usan mecanismos de difusión para comunicarse con su entorno.
- Las redes de sensores inalámbricos presentan tolerancia a fallos.
- Típicamente están basadas en el estándar 802.15.4 ZigBee.
- Los nodos bajan su costo luego que pasan del proceso de ingeniería al proceso de producción.
- No se utiliza infraestructura de red, en su lugar cada nodo independientemente de su modo de trabajo sirve como puente para reenviar la información. El encaminamiento entre nodos no necesita visión directa con el nodo destino porque pueden usar comunicación multisalto.

3.2. ZigBee

El estándar ZigBee es una tecnología de comunicaciones creada por más de 300 empresas dedicadas a fabricar dispositivos semiconductores para afrontar proyectos de tipo inalámbrico a bajo costo y de manera global; además ZigBee funciona bajo el estándar IEEE 802.15.4.

3.2.1. Características del estándar ZigBee

Los principales beneficios del estándar ZigBee son:

- Utiliza la banda libre de 2.4GHz para establecer la comunicación entre nodos.
- La capacidad máxima del estándar ZigBee es de 257 subredes distintas enganchadas a un canal con 255 nodos por cada subred, pero físicamente es imposible que esto se pueda dar.
- La red que forma el estándar no tiene sincronía y el modo de acceso al canal es por medio de CSMA/CA.
- El rango de la velocidad de transmisión es de 25 Kbps a 250 Kbps.
- No se ve afectado por compartir la misma frecuencia con otras tecnologías ya existentes, gracias a su baja tasa de transmisión.
- Es un protocolo fiable, la red se organiza y se repara de forma automática y se enrutan los paquetes de manera dinámica.
- El área de cobertura puede incrementarse siempre y cuando en la red hayan nodos intermedios entre dos nodos, con el fin de volver a restablecer el enlace.
- La topología de red tipo malla amplía la confiabilidad debido a su auto recuperación y la creación de varias rutas que aumentarán siempre y cuando se extienda el número de nodos en la red, lo cual garantiza la recepción de los paquetes enviados.
- El protocolo ofrece seguridad debido a que se puede implementar encriptación y autenticación.
- Los tiempos para la entrega y recepción de paquetes se reducen considerablemente.

Las topologías de red son las siguientes:

- Estrella: Conformado por un nodo central y N módulos de transmisión y recepción conectados a él.

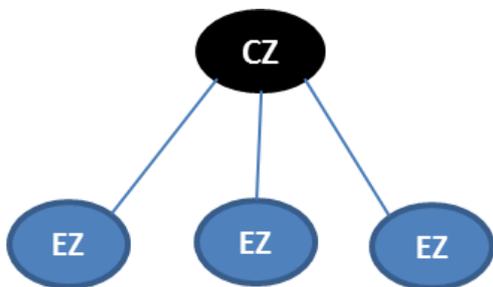


Figura 2. Topología ZigBee tipo estrella.

- Árbol: Cada nodo padre puede tener N nodos hijos según la profundidad de la red.

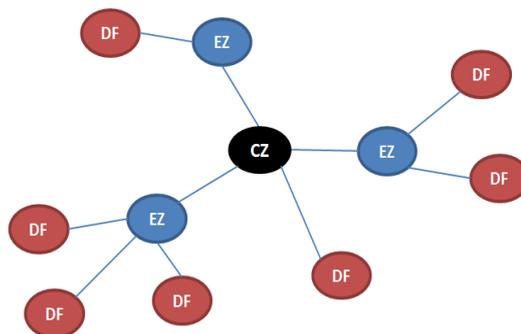


Figura 3. Topología ZigBee tipo árbol.

- Malla: Esta topología permite la interconexión entre los nodos enrutadores por lo que siempre se aseguran caminos alternativos en caso de caída de cualquier nodo de la red [1].

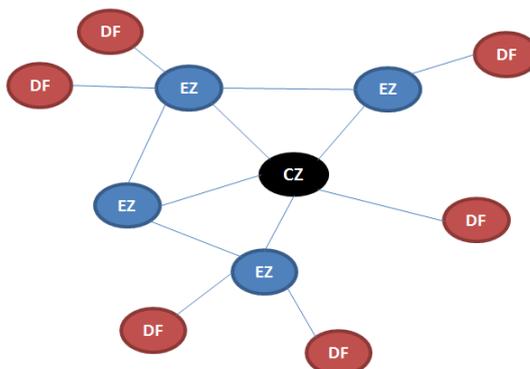


Figura 4. Topología ZigBee tipo malla.

3.2.2. Tipos de dispositivos

Según la función que desempeñan en la red se clasifican en:

- Coordinador ZigBee (ZigBee Coordinator, ZC).- Este dispositivo inicia la generación de la red y la controla, debido a que se le cargan la mayor cantidad de funciones y solo hay uno por red. Sus principales tareas son de examinar las rutas creadas y elegir la mejor opción para el posterior envío del paquete entre los nodos.
- Enrutador ZigBee (ZigBee Router, ZR).- Se encarga de enlazar a todos los dispositivos que conforman la red, asociándose con el coordinador y los elementos de su tipo; también permite la ejecución de código de parte del usuario.
- Dispositivo final (ZigBee End Device, ZED). - Es el dispositivo de menor funcionalidad, ya que no se comunica con todos los nodos de la red, a excepción de su nodo padre, ya sea un ZC o ZR según el caso. Por sus escasos recursos,

comparados con los demás tipos de dispositivos, el ZED consume menor energía aumentando el tiempo de vida de las baterías.

3.2.3. Control de acceso al medio

Los nodos que forman parte de una red acceden al canal usando CSMA/CA (Detección de Portadora de múltiple acceso con evitación de colisión), aquí un nodo que desea transmitir datos tiene que escuchar primero el canal por una cantidad predeterminada de tiempo para determinar si otro nodo está transmitiendo en el canal inalámbrico. Si el canal está inactivo entonces el nodo puede empezar el proceso de transmisión, si el canal está ocupado el nodo aplaza su transmisión durante un período de tiempo aleatorio. Aún pueden existir colisiones [2].

Para mejorar la eficiencia del método de acceso el emisor puede enviar tramas de solicitud de envío (RTS) al receptor pidiendo hacer uso del canal, luego el receptor envía el permiso en una trama llamada listo para enviar (CTS), esta trama además es recibida por todos los nodos que comparte el medio dejando libre el canal [3].

3.3. Introducción a XCTU

La multiplataforma XCTU es una aplicación desarrollada por la Digi el cual facilita al usuario interactuar con módulos de transmisión y recepción XBee. La nueva versión de este software aumenta la funcionalidad que permite realizar un análisis más profundo sobre una red creada.



Figura 5. Pantalla de inicio de XCTU

La figura 5 muestra la pantalla de inicio de XCTU, la cual contiene herramientas que un programador requiere para la rápida configuración de los módulos XBee. Las características como la visualización de la topología de red, que representa gráficamente la red XBee junto a la fuerza de la señal recibida (RSSI) y el formador de tramas API XBee, que intuitivamente ayuda a construir e interpretar las tramas API, se combinan para hacer que el desarrollo en la plataforma XBee sea más sencillo [4].

3.4. Modelo de Propagación

El modelo de propagación es de mucha ayuda, para diseñar redes de comunicaciones inalámbricas ya que se incluyen condiciones ambientales, geográficas, topográficas, ubicación de los equipos y demás parámetros, con el fin de analizar los factores que permitan obtener la mayor cobertura en la red.

3.4.1. Modelo dependiente de las particiones de un sitio

Dicho modelo se lo aplica por lo general en propagaciones en interiores, e incluye todos los obstáculos que encuentra la señal al pasar por diferentes tipos de paredes y pisos, por lo cual es importante tener datos concretos de la edificación donde se pretende saber las pérdidas [5].

El modelo dependiente de las particiones de un sitio está dado por la siguiente ecuación:

$$L_p = L_o + 20 \log d + \sum_{\text{tipo}} m_{\text{tipo}} W_{\text{tipo}} \quad (3.1)$$

Dónde:

m_{tipo} Es el número de particiones de un ‘tipo’ en particular.

W_{tipo} Es la pérdida de potencia asociada a dicho tipo de partición.

L_o Es la pérdida de paso (o de la señal) a una distancia de 1 m.

Tabla 1. Valores de pérdida por tipo de obstáculo

Atenuación de una Señal de 2.4 GHz	dB
Ventana en una pared de ladrillos	2
Pared de Vidrio, con bordes metálicos	6
Pared de Oficina	6
Puerta metálica en una pared de oficina	6
Pared hecha con Ceniza volcánica	4
Puerta metálica en una pared de ladrillos	12.4
Pared de ladrillos junto a la puerta	3

3.5. Temperatura del cuerpo humano

La temperatura corporal permite evaluar la eficiencia de la regulación térmica que se presenta en el cuerpo humano en función de los cambios en la temperatura ambiental y la intensidad de la actividad realizada [6].

Hay dos tipos de temperaturas:

- La temperatura central (núcleo: cerebro, grandes vasos, vísceras, músculo profundo, sangre) se mantiene constante.
- La temperatura periférica (piel, mucosas, músculos, extremidades, etc.) es variable.

3.5.1. Temperatura promedio del cuerpo humano

La temperatura normal del cuerpo humano oscila entre 36,5°C y 37,5°C, en la especie humana, se considera fiebre un aumento de la temperatura corporal, con medidas en la axila, superior a 38°C. A continuación se enlistan las reacciones del ser humano a las diferentes temperaturas corporales [7]:

- 36°C.-En promedio se considera la temperatura normal entre 36°C a 37.5°C.
- 39°C.-La persona presenta excesivo sudor sintiendo agotamiento y taquicardias; a los epilépticos y niños les causa convulsiones llegados a este punto.
- 40°C.-Constantes mareos, niveles de deshidratación altos que causan debilidad y vómitos.
- 41°C.-Se presentan los mismos síntomas al anterior pero a una escala más elevada con alucinaciones y delirio.
- 42°C.-Se puede llegar al coma según el organismo con hipertensión y una gran taquicardia.
- 43°C o superior.-En esta etapa se da la muerte del paciente o puede dejar grandes daños al organismo con continuas convulsiones dando la posibilidad de un paro cardiorrespiratorio.

4. Diseño de la solución

En esta sección se explican los detalles del diseño e implementación del proyecto mediante la elaboración de un diagrama de bloques que muestra el funcionamiento básico de cada etapa correspondiente al proyecto.

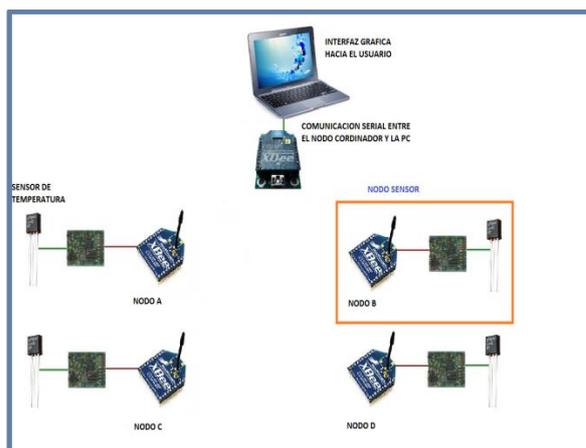


Figura 6. Diagrama Esquemático

En la figura 6 se muestra un esquema general del prototipo en donde se observan los principales componentes utilizados en el diseño. Para evitar confusiones, la unión del sensor de temperatura con la placa electrónica y el módulo XBee tomará el nombre de 'Nodo Sensor'; mientras que el módulo XBee será llamado 'Nodo'.

En la figura 7, se muestra el nodo sensor implementado en su totalidad, se utilizó una película termo retráctil para proteger del ambiente, al cable que une el sensor con la placa.

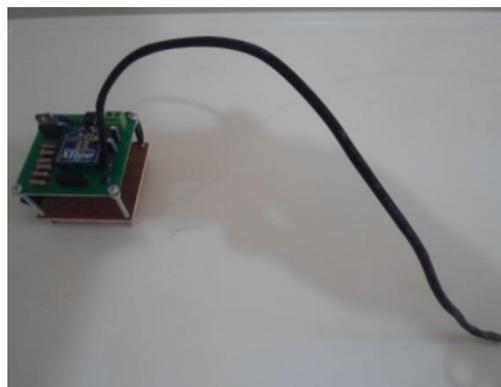


Figura 7. Nodo Sensor

4.1. Descripción técnica de los componentes

En esta sección se presentan los componentes que forman parte del diseño de la solución, con la correspondiente descripción de sus características principales.

4.1.1. Módulo XBee serie 2

Los módulos XBee que se observan en la figura 8 son dispositivos electrónicos que se comunican entre sí de manera inalámbrica utilizando el protocolo IEEE802.15.4 mejor conocido como ZigBee. Estos módulos ofrecen soluciones en 2.4 GHz.



Figura 8. Módulo XBee

XBee provee 2 tipos de comunicación, listados y detallados a continuación:

Modo AT

La comunicación se asemeja a un enlace serial virtual entre dos módulos, los datos ingresados por el pin 3, son almacenados en un buffer de entrada y transmitido posteriormente. Todos los datos luego ingresarán como paquetes RF y serán almacenados en el buffer de salida, para finalmente ser transmitidos por el pin 2 hacia un microcontrolador típicamente. El modo AT viene como configuración de fábrica en los dispositivos.

Modo API

Es un método de envío y recepción de datos, basado en tramas desde y hacia el enlace serial UART del módulo. Aquí un microcontrolador externo es el encargado de crear un paquete que cumpla con los estándares API. API permite al programador:

- Cambiar parámetros sin ingresar al modo de comandos.
- Ver el RSSI y la dirección de origen de un paquete.
- Observar la topología de la red.
- Recibe la confirmación de entrega de paquetes en cada paquete recibido [8].

En la figura 9 se muestra la trama de datos que cada nodo enviará al coordinador, la parte de la trama que varía es la del dato, que cambiará según el registro de temperatura del sensor LM35; el primer byte del dato enviado a la trama corresponde a un identificador de los nodos sensores, que en este caso es el byte en hexadecimal 41 que corresponde a la letra 'A' en ASCII. También hay que tomar en cuenta, que cada trama tendrá su checksum respectivo, el cual es el identificador que el nodo coordinador recibe y se encargará de aceptar o rechazar la trama.

4.1.2. XBee Explorer

El XBee Explorer de la figura 10, es una placa electrónica de comunicación serial a través de USB, diseñada para permitir interacción entre los dispositivos XBee y una computadora. Luego, a través de un cable mini-USB se logran transferencias con un rango de 300 baudios hasta 3 Mbaudios, capaz de soportar paquetes de 7 a 8 bits de datos, con 1 o 2 bits de parada y paridad par/impar/espacio. Cuenta con indicadores LED para el voltaje de alimentación de 3.3V y para el indicador de actividad XBEE (RSSI), para la transmisión y recepción de datos [9].



Figura 10. XBee Explorer USB

Inicio de Trama	7E	Longitud de la trama	00 13	Tipo de trama	10	ID de trama	01	Dirección de destino de 64 bits	00 00 00 00 00 00 FF FF	Dirección de destino de 16 bits	FF FE	Numero de saltos	00	Opciones	00	Dato	41 33 37 FA	Checksum	1A
																	34		

Tipo de trama: 10 envía datos; 21 crea una ruta; A0 actualización remota de firmware
 Longitud de la trama va desde el campo Tipo de trama hasta el campo Dato
 Checksum= FF - 'Todos los campos que conforman la Longitud de la trama'
 Checksum = FF - [10 + 01 + 00 + 00 + 00 + 00 + 00 + 00 + FF + FF + FF + FE + 00 + 00 + 41 + 33 + 37 + FA + 34]
 Checksum = FF - 5E5
 Checksum = FF - E5
 Checksum = 1A

Figura 9. Trama API

4.1.3. Sensor de Temperatura

La serie LM35 (figura 11) es un sensor de temperatura de precisión, cuyo voltaje de salida es linealmente proporcional a la temperatura en grados centígrados. Tiene previsto trabajar en el rango entre -55°C hasta +150°, con un voltaje de alimentación entre 4 y 30V.

El factor de escala lineal es +10mV/°; por ejemplo 27°C reflejaría una tensión de 0.27V en el pin de salida [10].

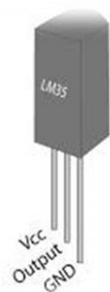


Figura 11. Sensor de temperatura LM35

4.1.4. Microcontrolador PIC 12LF1822

Microcontrolador de soldadura superficial de 8 pines, el ancho del bus de datos es 8bits, cuenta con una memoria RAM de 128 Bytes, el tamaño de la memoria programable es de 3.5 KBytes y el tamaño de la memoria EEPROM es de 256 Bytes. La velocidad máxima del oscilador interno es de 32 Mhz teniendo disponible la opción de un oscilador externo. Cuenta con periféricos ADC, un canal PWM y comunicación serial UART [11].

4.2. Diagrama de bloques

En este subcapítulo se detalla cada sección del diagrama de bloques que se muestra en la figura 12; cabe recalcar que todas las etapas en conjunto con forman un nodo sensor.

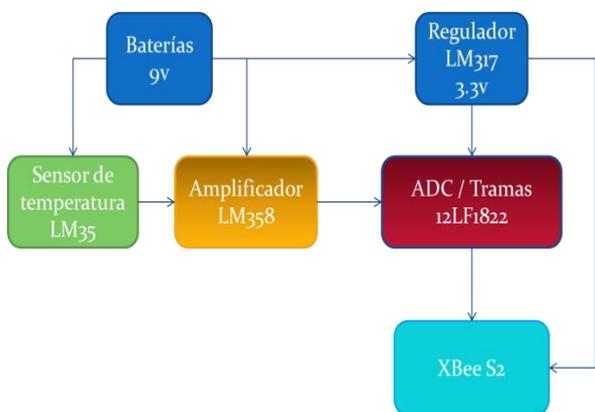


Figura 12. Diagrama de bloques de cada nodo sensor

4.2.1. Fuente de alimentación

El diseño de la solución implica el uso de dos fuentes de alimentación de corriente continua, una de 9VDC y otra de 3.3VDC. La fuente de 9VDC servirá para energizar el amplificador operacional LM741, el cual se obtiene directamente de una batería. La fuente de 3.3VDC servirá para energizar al microcontrolador y al module XBee-S2, este valor de voltaje se obtiene del circuito basado en el regulador LM317.

4.2.2. Obtención de datos del sensor

Inicialmente se tiene que considerar el funcionamiento del sensor LM35, quien entrega en su pin de salida 10mV por cada grado centígrado, siendo este valor una señal analógica. La máxima temperatura que puede detectar el sensor es 150°C, entonces tenemos que el voltaje máximo de salida es $10\text{mV} \times 150 = 1.5\text{V}$, como cota superior y 0°C que reflejara 0V en su cota inferior, esto por funcionar con una fuente positiva. Sin embargo por el tipo de aplicación el rango de trabajo real estará entre 35°C y 42°C. El circuito electrónico implica conectar el pin 1 a +Vcc, el pin 3 a tierra, mientras el pin 2 es la lectura del sensor.

4.2.3. Amplificación de la señal de temperatura

Con el objetivo de obtener una mejor medición y resolución de la señal de temperatura, se amplifica la señal dentro del rango de interés, limitado por el voltaje offset del amplificador, como analizamos a continuación:

$$\begin{aligned}
 150^\circ\text{C} &\rightarrow 1500 \text{ mV} \times 6.6 \rightarrow 9.9\text{V} \rightarrow \text{cota del OPAMP} \rightarrow 7\text{V} \rightarrow 70^\circ\text{C} \\
 -55^\circ\text{C} &\rightarrow -550 \text{ mV} \times 6.6 \rightarrow -3.63\text{V} \rightarrow \text{cota del OPAMP} \rightarrow 0\text{V} \rightarrow 0^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

4.2.4. Conversión analógica/digital y creación de tramas

Luego que la señal de temperatura ha sido amplificada, se necesita hacer la conversión analógica/digital de la misma, de esta manera la señal presentara mayor inmunidad ante el ruido que se presenta en la transmisión y para que los datos puedan ser interpretados por la computadora. Además el envío de datos debe cumplir un tipo de trama para no ser descartado.

El microcontrolador PIC 12LF1822 superficial fue la mejor opción para el diseño de la solución debido a su pequeño tamaño, adicional se tuvo que colocar espadines conectados directamente a los 5 pines del microcontrolador que permiten cargar nueva información en el microcontrolador estando soldado a la placa, los pines utilizados son: Vcc, Gnd, Mclr, Dato, Reloj.

```

UART1_Write (0x7E); //Inicio de trama
UART1_Write (0x00); //Longitud de trama
UART1_Write (0x13);
UART1_Write (0x10); //Tipo de trama
UART1_Write (0x01); //ID de trama
UART1_Write (0x00); //Direccion de destino
UART1_Write (0x00); //de 64 bits
UART1_Write (0x00);
UART1_Write (0x00);
UART1_Write (0x00);
UART1_Write (0x00);
UART1_Write (0xFF);
UART1_Write (0xFF); //Direccion de destino
UART1_Write (0xFE); //de 16 bits
UART1_Write (0x00); //Numero de saltos
UART1_Write (0x00); //Opciones
UART1_Write (0x45); //DATO: ID de nodo
for(i=0;i<4;i++)
{
UART1_Write(txt[i]); //DATO
}
UART1_Write (chkm); //Checksum
Delay_ms(100);
UART1_Write(10); //Salto
UART1_Write(13); //Retorno de linea
} while(1);

```

Figura 13. Código para envío de la trama

La figura 13 presenta las líneas usadas para realizar la transmisión de la trama API gracias a la función UART_Write a través de comunicación serial.

```

UART1_Init(19200); // Initialize UART module at 9600 bps
Delay_ms(100); // Wait for UART module to stabilize
PORTA=0xFF;
}
void main() {
config();
do {
temp_res = ADC_Read(3); // Get 10-bit results of AD conversion
floatvar = (float)temp_res*99/2048;
FloatToStr(floatvar, txt);

```

Figura 14. Código para la conversión analógica/digital

La figura 14 muestra la inicialización de la transmisión UART, la variable de tipo 'string' que contiene la información digital con resolución de 10 bits es 'txt'. El dato que sale de la conversión analógico/digital está en el rango de entre 0 y 1024 por lo que debe ser re-convertido a la señal de temperatura original. Para llevar a cabo esta re-conversión se debe mostrar cómo se ejecuta la conversión analógico/digital.

4.2.5. Transmisión entre cada nodo sensor y el dispositivo coordinador

Al módulo XBee llega una señal digital amplificada y en texto plana, la cual está lista para ser transmitida, esto se realiza en bandas de frecuencia de

uso libre (2,4 GHz). Existen 16 canales disponibles con 5 MHz de frecuencia entre ellos, partiendo de la frecuencia 2.405 GHz, se llega hasta los 2.480 GHz.

Para que los módulos de transmisión puedan intercambiar información entre ellos deben cumplir ciertos requisitos: deben pertenecer todos los dispositivos a la misma red, es decir, deben tener el mismo PAN-ID (Personal Area Network), y trabajar todos en el mismo canal.

4.2.6. Comunicación entre el dispositivo coordinador y el computador

La transmisión serial UART, crea la comunicación entre el dispositivo coordinador y la computadora, aquí llega la información de cada sensor como texto plano dentro de una trama pero de forma individual, en la figura 15 se muestran los componentes físicos que hacen posible la comunicación serial. El 'Baud rate' configurado es de 19200.



Figura 15. Componentes de la comunicación serial

4.3. Interfaz gráfica hacia el usuario

Basado en el software de desarrollo LabVIEW. Aquí se muestra la temperatura obtenida por cada nodo que forma parte de la red. La figura 16 muestra la interfaz hacia el usuario, en el ambiente de LabVIEW es conocido como panel frontal.

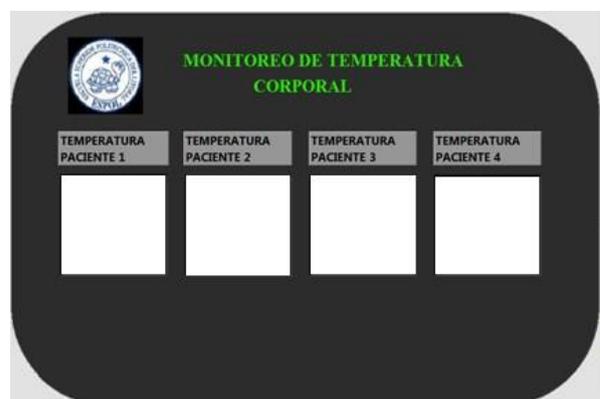


Figura 16. Panel frontal de la interfaz gráfica

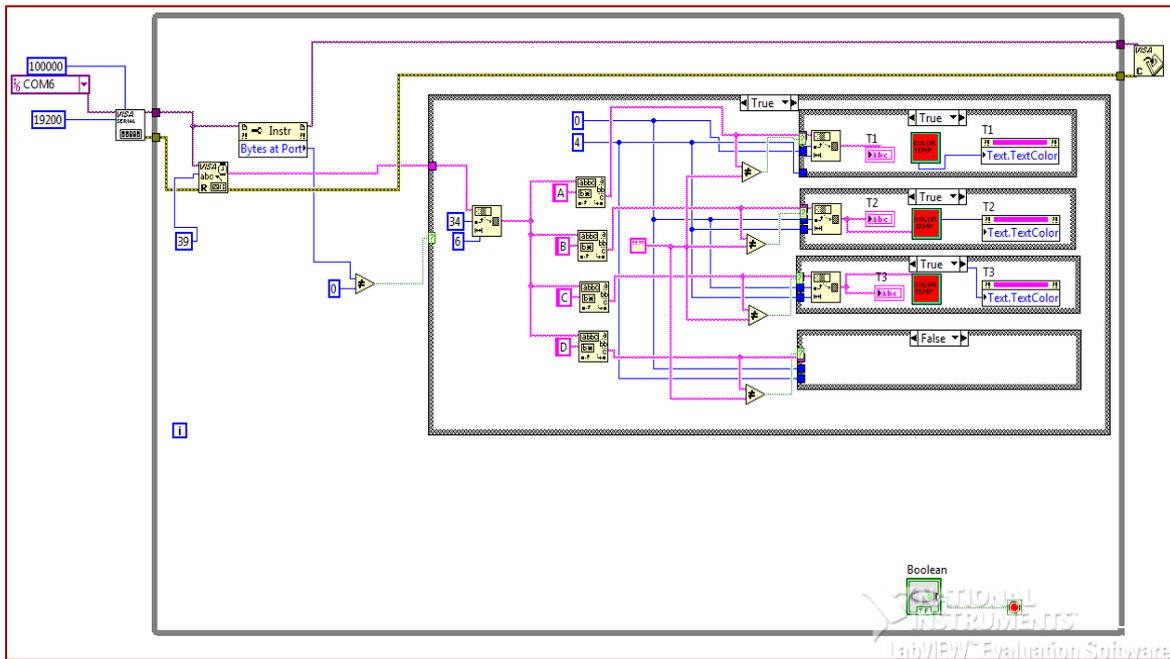


Figura 17. Diagrama de bloques de la interfaz gráfica

La figura 17 muestra todo el proceso aplicado para poder mostrar el dato, que empieza con la adquisición de este desde el puerto serial vía USB se logra gracias a la herramienta NI-VISA, el cual posee los bloques que permiten abrir, leer, escribir y cerrar el puerto serial. Los datos que ingresan al puerto son leídos en bloques de 39 Bytes que es la longitud de la trama recibida, antes de continuar se verifica que los Bytes en el puerto sean mayor a cero. Paso seguido se realiza un filtrado de la trama recibida para obtener solo los datos de interés (Byte número 34 con 5 Bytes de longitud).

Se usa una estructura 'Match Pattern' para realizar la comparación del carácter identificador de nodo, así el dato que ingresa es separado según el nodo del cual proviene sean estos A,B,C o D. A continuación la estructura 'StringSubset' filtra el dato a ser mostrado en un indicador.

5. Pruebas y análisis de resultados

Este capítulo abarca todo lo correspondiente a la implementación y diseño de la solución, pero en su estado funcional y operativo. En donde se nota la real capacidad y eficacia del proyecto, ya utilizado en el entorno real, por lo expuesto anteriormente los datos mostrados de potencia, temperatura y topología de red se obtuvieron en el hospital 'Reina del Cisne' ubicada en la ciudad de 'Piñas' provincia de 'El Oro'. En la figura 21 se muestra el plano del 3er piso en donde se desplegaron las pruebas.

5.1. Pruebas de medición de temperatura corporal

Para realizar la medición de temperatura corporal en el paciente, se consideran su bienestar y comodidad con el nodo sensor, que se encarga de procesar y enviar la información de su temperatura actual al dispositivo coordinador (estación de enfermería), la cual se actualizará a cada momento para su respectivo monitoreo.

Considerando que el sensor de temperatura se colocó entre el brazo y el antebrazo del paciente; se calcula la diferencia en grados centígrados que existe entre esta y la temperatura axilar dando el valor de 1,55 °C, siendo la temperatura axilar la de mayor valor

Como se sabe una persona tiene fiebre cuando la temperatura registrada en la axila supera los 38°C, lo que indica que hay fiebre entre el brazo y el antebrazo cuando se supera los 36,45°C.



Figura 18. Monitoreo de temperatura

En la fig. 18 se muestra la interfaz gráfica que permitirá al personal médico visualizar la temperatura de sus pacientes, en este caso se ve que los nodos sensores correspondientes al paciente 1 y al paciente 3 tienen temperaturas de 37.0°C y 37.3°C respectivamente, los cuales registran valores que indican fiebre. Los otros pacientes tienen temperaturas corporales en el rango normal ya establecido.

5.2. Creación de red mallada y cambios de topología

Para la creación de la topología de red, se utiliza el software creado por la Digi llamado X-CTU. Cabe indicar que la topología corresponde a una red mallada, la cual es generada y conformada por 5 módulos XBee S2, que se denominan nodos; configurados uno en modo de coordinador API y los restantes en modo enrutador AT.

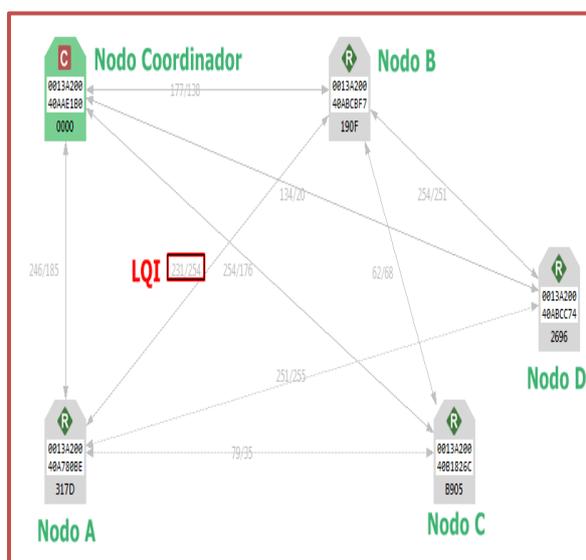


Figura 19. Topología de red completa

En la figura 19 se observa la generación de la red mallada, con todos los nodos sensores conectados a cada paciente, en donde se nota que los dispositivos tienen un tipo de conexión en la topología a excepción del nodo C con el nodo D, debido a la ubicación de estos es la más lejana y por la pérdida que causa el ascensor en el sitio.

Así mismo se muestra el parámetro Indicador de calidad de la señal (LQI) que muestra la calidad en los enlaces de recepción y transmisión que hay entre módulos XBee (nodos); además el LQI suele usarse como mecanismo de ruteo en una red mallada, lo cual sirve para elegir rutas con LQI más alto.

Además se tiene que el mejor LQI con referencia al nodo coordinador son el nodo A y el nodo C con valores de transmisión y recepción de 246/185 y 254/176 respectivamente, lo que indica que hay mejor

garantía de que los paquetes lleguen a su destino; mientras tanto el enlace con el peor LQI respecto al nodo coordinador es el nodo D, con lo que se puede deducir que el indicador de calidad del enlace decrece cuando la distancia aumenta entre nodos.

5.3. Medición del indicador de fuerza de la señal recibida

El software XCTU además de facilitar la topología de red, permite conocer la fuerza de la señal recibida (RSSI) y la cantidad de paquetes recibidos, accediendo a la opción "Range test". Debido a que la verificación del prototipo se realizó en el hospital ya descrita anteriormente, la prueba pertenece a un ambiente sin línea de vista.

La figura 20 muestra los datos obtenidos del RSSI de un nodo de los cuatro existentes y los paquetes recibidos. Se debe tomar en cuenta que esta prueba siempre interviene el nodo coordinador en cada caso.

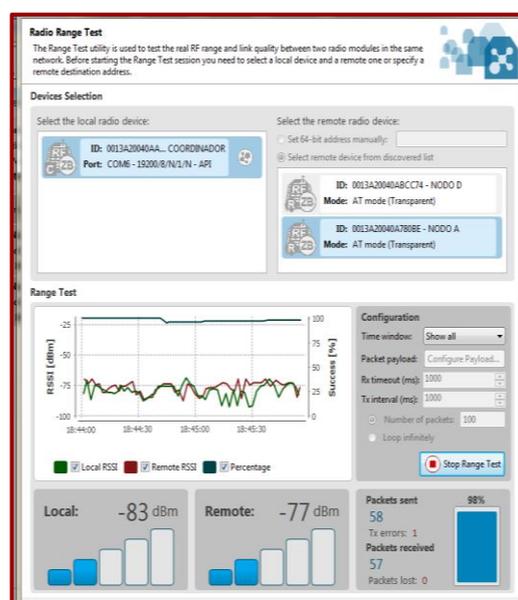


Figura 20. RSSI Nodo A

Ahora se adecuar los datos que vemos en la figura anterior y de los nodos B, C y D para su respectivo análisis.

Tabla 2. Niveles de RSSI de todos los nodos

	RSSI remota [dBm]	% De éxito en la transmisión
NODO A	-77	98
NODO B	-83	98
NODO C	-79	86
NODO D	-83	79

De la tabla 2, se verifica que el nodo A posee el mejor nivel de recepción esto se debe a su corta distancia respecto al nodo coordinador. El nodo B posee el nivel de recepción más bajo debido a la cantidad de obstáculos que posee. Además los nodos C y D son quienes registran los niveles más bajos de éxito en la transmisión de paquetes.

5.4. Modelo de propagación

En la figura 21 se muestra la distribución de los nodos sensores en 3 de los 6 dormitorios, en base al plano se puede identificar la trayectoria de la onda electromagnética detallada en la imagen junto a la distancia que recorre.

Tabla 3. Atenuación según obstáculos en el hospital.

Obstáculos en el Hospital	Rango de atenuación (dB)
Pilar de cemento	16
Pared de un ascensor junto a la pared de ladrillos	12,5
Pared de ladrillo	10
Puerta de madera	4

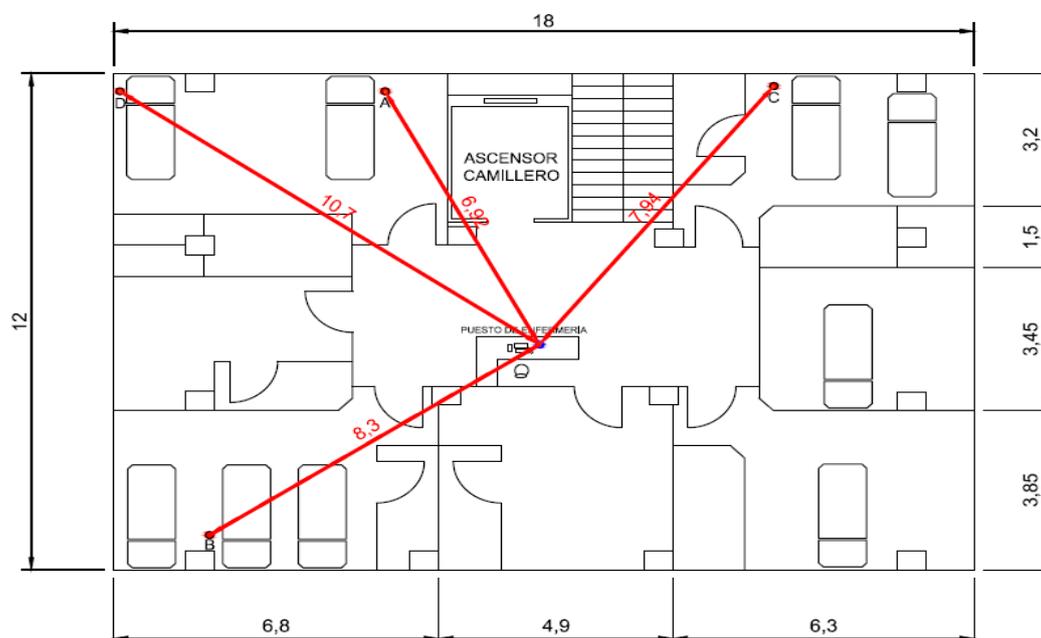


Figura 21. Proyección de los nodos sensores en el 3er del piso del hospital

Según el modelo dependiente de las particiones de un sitio, se realiza el cálculo de los niveles de potencia de la señal recibida en cada nodo sensor ubicados en los cuartos del hospital.

Los valores de atenuaciones según el obstáculo atravesado se basan de la tabla 1. En la tabla 3 vemos las pérdidas según los obstáculos (W_{tipo}) que hay en el hospital.

El valor de la potencia de transmisión (P_{tx}) según la hoja del fabricante es de 3 dBm.

La pérdida a un metro (L_0) es un valor que se requiere para poder calcular la pérdida total de cada conexión inalámbrica, y está dada por la siguiente ecuación:

$$L_0 = -10 \log G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \quad (5.1)$$

Dónde:

G_t y G_r son las ganancias de las antenas transmisoras y receptoras respectivamente.

λ Es la longitud de onda de la portadora dada por la ecuación:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (5.2)$$

Para el cálculo de la longitud de onda se necesita el valor de la velocidad de la luz (c), cuyo valor es 3×10^8 m/s. Mientras tanto la frecuencia es de 2,4 GHz, que corresponde a la banda libre en que trabaja el estándar ZigBee; a continuación se halla el valor de la longitud de onda.

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2,4 \times 10^9 \text{ 1/s}}$$

$$\lambda = 0,125 \text{ m}$$

Al encontrar la longitud de onda, solo falta conocer las ganancias de transmisión y recepción del módulo XBee, que se estiman con el valor de 1 o 0 dBi. Con estos datos se procede a calcular la pérdida a un metro.

$$L_o = -10 \log(1)(1) \left(\frac{0,125}{4\pi} \right)^2$$

$$L_o = 40,05 \text{ dB}$$

A continuación se realiza los cálculos pertinentes para encontrar los valores de potencia recibido para cada uno de los nodos. En este caso se muestra los cálculos para el nodo C.

$$L_{pC} = L_o + 20 \log d + \sum_{\text{tipo}} m_{\text{tipo}} W_{\text{tipo}} \quad (5.3)$$

Entre el nodo coordinador y el nodo C la distancia es de 7.94mts, respecto a los obstáculos hay 2 paredes de ladrillos y una puerta de madera.

$$L_{pC} = L_o + 20 \log 7.94 + 2(10) + 1(4)$$

$$L_{pC} = 40.05 + 18 + 20 + 4$$

$$L_{pC} = 82,05 \text{ dB}$$

Luego la potencia de la señal recibida en el nodo 'C' es:

$$PrxC = PtxC - L_{pC} \quad (5.4)$$

$$PrxC = 3\text{dBm} - 82,05\text{dB}$$

$$PrxC = -79,05 \text{ dBm}$$

A continuación, se hace una comparativa entre los valores de potencia de la señal recibida, obtenidos teóricamente en este subcapítulo, con los valores obtenidos experimentalmente que están descritos en el subcapítulo 5.3 y mostrado en la tabla 4.

Tabla 4. Porcentaje de error del RSSI

	RSSI teórico	RSSI experimental	% error
NODO A	-82,8	-77	6,89
NODO B	-81,88	-83	1,36
NODO C	-79,05	-79	0,06
NODO D	-87,63	-83	5,28

5.5. Verificación del sistema en entorno real

En esta sección se ilustra paso a paso el acoplamiento de los nodos sensores y del nodo coordinador en el ambiente del hospital, para la respectiva obtención de los datos, que se muestran

y analizan en las secciones anteriores correspondientes a este capítulo.

En la figura 22 y 23 se muestran la estación de enfermería y la colocación de la computadora portátil con el nodo coordinador en dicho puesto.



Figura 22. Estación de enfermería

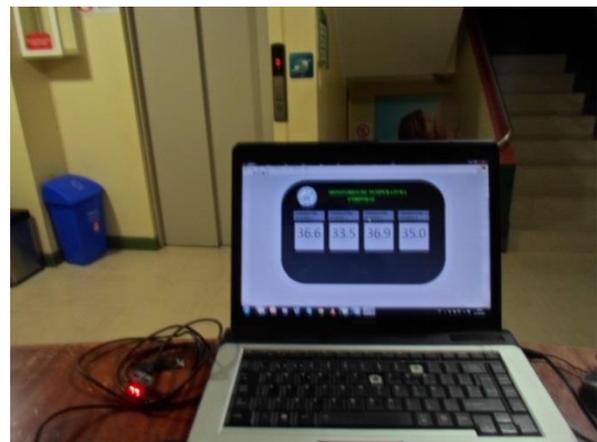


Figura 23. Colocación de PC en estación de enfermería

De la figura 24 se observa cómo se adapta el nodo sensor a las habitaciones.



Figura 24. Adaptación del nodo sensor

En las figuras 25 y 26 se observa la ubicación del sensor LM-35 entre el brazo y antebrazo de los pacientes.



Figura 25. Colocación del sensor al paciente (1)



Figura 26. Colocación del sensor al paciente (2)

6. Conclusiones

- Se logró desarrollar un prototipo que permite monitorear en tiempo real los valores de temperatura corporal de cuatro nodos, además de crear entre ellos una topología mallada.
- Para poder observar los valores obtenidos por los sensores de temperatura se creó una interfaz gráfica desarrollada en LabVIEW, esto se realizó con el uso de comunicación serial otorgada por la herramienta NI-VISA para transmitir los datos desde el nodo coordinador hacia la computadora.
- La creación de una topología mallada se logró gracias a la característica de los módulos XBee los cuales al trabajar en modo API permiten establecer esta red.
- El modelo de propagación dependiente de las particiones de un sitio es el acertado, debido a las características del sitio donde se probó el proyecto. Esto se corroboró con los datos obtenidos del programa XCTU.

- El proceso de conversión analógica digital se llevó a cabo por el microprocesador 12LF1822 quien brinda una resolución de 10 bits, esto realizado por una función dentro del programa 'MicroC'.
- Basado en las herramientas Proteus y MicroProforPic se creó un circuito electrónico que permite medir y procesar la temperatura corporal en tiempo real.
- Se logró establecer una red mallada que proporciona amplia cobertura y tolerancia a fallas entre los enlaces.
- Gracias al software LabVIEW se realizó una interfaz gráfica donde se muestra la información de temperatura corporal correspondiente a cada paciente, además de mostrar una alarma en el caso que una temperatura sensada supere los valores recomendados.

7. Recomendaciones

- Se puede mejorar la sujeción del sensor de temperatura con la superficie del paciente para obtener una medición más fiable.
- Se sugiere revisar la carga de la batería, ya que variaciones en el voltaje de entrada provoca errores de medición, una opción válida es usar una fuente de energía constante.
- Tener presente que se debe configurar los mismos parámetros de comunicación serial en la herramienta de LabVIEW NI-VISA y la comunicación serial entre el dispositivo coordinador y el computador.
- Verificar que todos los módulos XBee S2 se encuentren en la misma red, es decir que compartan la misma canalización y el mismo PAN-ID (Personal Area Network).
- Al usar la función UART_Write del software MicroCProforPIC para la programación del PIC, verifique que se envíe la trama API correcta, caso contrario el paquete será descartado por todos los nodos.

8. Referencias.

- [1] ZigBee y sus aplicaciones, <http://www.dea.icaei.upco.es/sadot/Comunicacione/s/avanzadas/ZIGBEE%20y%20sus%20aplicacione.s.pdf>, fecha de consulta: Septiembre 2014.
- [2] Detección de Portadora de acceso múltiple con prevención de colisión, https://www.princeton.edu/~achaney/tmve/wiki100k/docs/Carrier_sense_multiple_access_with_collision_avoidance.html, fecha de consulta: Noviembre 2014.

- [3] CSMA/CA, https://www.tlm.unavarra.es/~daniel/docencia/arss/arss11_12/slides/34-CSMA-CA.pdf , fecha de consulta: Noviembre 2014.
- [4] XCTU, <http://www.digi.com/products/wireless-wired-embedded-solutions/ZIGBEE-rf-modules/xctu> , fecha de consulta: Noviembre 2014.
- [5] Diapositivas ‘Características del medio Inalámbrico’ autor: Ph.D. Boris Ramos.
- [6] Temperatura corporal, <http://www.dalcame.com/tc.html#.VIOy0X9gh8J> , fecha de consulta: Octubre 2014.
- [7] Temperatura del cuerpo humano, <http://temperaturadeuncuerpohumano.blogspot.com> , fecha de consulta: Octubre 2014.
- [8] Digi, What is API (Application Programming Interface) Mode and how does it work? <http://www.digi.com/support/kbase/kbaseresultdetl?id=2184> , fecha de consulta: Septiembre 2014.
- [9] Ideas y Tecnología, XBEE-USB I&T, <http://www.ideastechnology.com/?q=node/119> , fecha de consulta: Septiembre 2014.
- [10] LM35, Precision Centigrade Temperature Sensors, <http://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/lm35.pdf>, fecha de consulta: Septiembre 2014.
- [11] MICROCHIP, PIC12LF1822, <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/40001413D.pdf>, fecha de consulta: Septiembre 2014.