

DISEÑO DE UN SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN Y MEDIDA INALÁMBRICO PARA LA ATENCIÓN HOSPITALARIA: UNA ALTERNATIVA



DESIGN OF A WIRELESS MEASUREMENT SYSTEM FOR HOSPITAL CARE: ONE ALTERNATIVE

AUTOR

CARLOS ALBERTO HENAO BAENA
Magister Ingeniería Eléctrica
*Sena - Tecnoparque
Gestor Tecnoparque
Línea de electrónica y Telecomunicaciones
c_henao_86@hotmail.com
COLOMBIA

AUTOR

ANDRÉS FELIPE CALVO SALCEDO
Magister Ingeniería Eléctrica
**Universidad Tecnológica de Pereira
Docente transitorio
Ingeniería electrónica
afcalvo@utp.edu.co
COLOMBIA

AUTOR

PAOLA YAZMIN IZQUIERDO BETANCUR
Estudiante Ingeniería Eléctrica
**Universidad Tecnológica de Pereira
Estudiante
Programa ingeniería eléctrica
paoutp19@hotmail.com
COLOMBIA

*INSTITUCION

Tecnoparque Nodo Pereira, Centro de Diseño e Innovación
Tecnológica Industrial.
Sena – Tecnoparque - CDITI
Cra. 10 #15-45 Pereira
tecnoparquenodopereira@gmail.com
COLOMBIA

**INSTITUCION

Universidad Tecnológica De Pereira
UTP
Cl. 27 #102 Pereira
contactenos@utp.edu.co
COLOMBIA

INFORMACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN O DEL PROYECTO: Este trabajo es uno de los productos desarrollados por el grupo GIIE-UTP. El proyecto dio inicio en abril del 2014 y en el mes de diciembre del mismo año se obtuvo los primeros resultados de la primera versión del producto.

RECEPCIÓN: 17 de Enero de 2016

ACEPTACIÓN: 10 de Marzo de 2016

TEMÁTICA: Teleaplicaciones

TIPO DE ARTÍCULO: Artículos de Investigación científica e innovación

Forma de citar: Henao Baena, C. A. (2015). Diseño de un sistema de instrumentación y medida inalámbrico para la atención hospitalaria: Una alternativa. En R, Llamosa Villalba (Ed.). Revista Gerencia Tecnológica Informática, 14(40), 33-45. ISSN 1657-8236.

RESUMEN ANALÍTICO

Los intercomunicadores son pequeñas centrales telefónicas que permiten comunicar paciente con el personal médico en un centro de salud. Esta función simple pero importante impacta no sólo la eficiencia del servicio sino además la calidad de vida de los pacientes. Sin embargo la demanda de servicio por parte del paciente debe ser de conocimiento público con el objeto de aumentar los índices de calidad del servicio prestado. En este documento se diseña un sistema de instrumentación y medida inalámbrico que informa al público, la habitación que demanda atención al personal médico en un centro de salud. El sistema utiliza una red de pulsadores que emula al intercomunicador, la cual envía las llamadas a un microcontrolador, el cual, procesa la información que finalmente es transmitida vía inalámbrica al indicador luminoso (Display). El sistema posee ventajas operativas como flexibilidad, portátil, fácil mantenimiento, fácil instalación, que lo hacen adaptable en escenarios similares.

PALABRAS CLAVES: Intercomunicador, Red Punto a multipunto, Microcontrolador, XBee.

ANALYTICAL SUMMARY

Intercoms are small telephone exchanges who allow to communicate the patients with medical staff in a clinic. This simple but important function impress in the service efficiency and in the quality of life of patients. However, demand service by patients must be in public knowledge for increasing the quality indicators of service. In this paper is designed a wireless instrumentation and measurement system that advise to the public the room which needs medical attention in a clinic. This system uses to a network switches that replace an intercom, which sends the phone calls to a microcontroller. This device process the information and it is transmitted through wireless to the display. The system have operative advantages as flexibility, it is portable, easy maintenance and installation, which make this system adaptable on similar stages.

KEYWORDS: Intercomunicator, Point network to Multi-point, micro-controller, XBEE.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas electrónicos basados en tecnología inalámbrica han sido ampliamente aplicados en diferentes sectores como la agricultura, la medicina, la minería y en muchas más áreas del sector productivo y científico en la última década [1]. Según [2] se estima que una de las grandes aplicaciones de las redes inalámbricas será el diseño y construcción de WSN (Wireless Sensor Network) con el propósito de extraer información monitoreando algún proceso físico.

Las WSN pueden ser clasificadas como sistemas de instrumentación y medida inalámbricos debido a que reemplazan la conexión física por una comunicación mediante señales electromagnéticas [3]. Las aplicaciones giran alrededor del monitoreo de variables físicas. Tal como se presenta en [4] donde los autores describen una experiencia en el monitoreo de temperatura y humedad en un cultivo de la granja Langmead España S.L, para

ello los autores proponen una WSN bajo el estándar ZigBee. Otro campo de interés es el sector minero donde las redes inalámbricas han sido introducidas con el propósito de monitorear variables ambientales en el interior de la mina, tal como se describe en [5] donde se diseña e implementa una WSN (bajo el estándar ZigBee) para monitorear la concentración de gas, con el objetivo de calcular e informar las concentraciones peligrosas de gases al interior de la mina. Los diseños propuestos poseen características funcionales bastantes atractivas (eficiente, estético, portátil, flexible), las cuales son posible debido a las propiedades de las redes inalámbrica.

Si bien el diseño de una red inalámbrica es en esencia paramétrico la novedad surge en la interpolación de estas tecnologías a dominios donde no ha sido aplicada, con el propósito de brindar solución a diferentes problemas o mejorar ciertas características operativas de algún equipo que con otras tecnologías no resulta posible.

En [6] se enseña el diseño y construcción de un sistema de instrumentación y medida que permite informar al público en general que habitación demanda el servicio del personal de enfermería en las instalaciones de un hospital. Los autores hacen uso de un intercomunicador (pequeña central telefónica), un microcontrolador y un indicador luminoso (display) y logran construir un dispositivo eficiente y adaptable a un gran número de entidades similares. Sin embargo el diseño propuesto en [6] posee algunas limitaciones. La primera tiene que ver con el mantenimiento del equipo en el caso de que ocurra una falla en los conductores que llevan las señales desde el intercomunicador hasta al elemento de visualización, lo cual aumenta no solamente los costos de operación del equipo sino además la calidad del servicio.

Por otro lado, si se desea adicionar un equipo (conectado al mismo intercomunicador) con el propósito de llevar información a otras salas de espera, resulta necesario transportar conductores desde el intercomunicador hasta el sitio donde se instalará el nuevo indicador. Esta maniobra no sólo es costosa, poco estética, inflexible sino que genera problemas de atenuación que pueden perjudicar el rendimiento del equipo.

En este documento se propone un sistema de instrumentación y medida inalámbrico con el propósito de dar solución a los problemas planteados anteriormente. El sistema utiliza el estándar ZigBee. Más exactamente se aplica el microcontrolador PIC16F886, la antena XBee PRO S2 y XBee S2, los cuales son la base del prototipo. La propuesta conserva la simplicidad y la metodología que se presenta en [6], Sin embargo el nuevo enfoque resalta la instalación, la flexibilidad, la portabilidad y la mantenibilidad del sistema.

Este documento está organizado como sigue. En la parte 1 se enseña brevemente el trabajo previo y el principio de funcionamiento del sistema propuesto en [6]. Posteriormente en la parte 2 se introduce la metodología y los materiales utilizados en el desarrollo del nuevo sistema, iniciando con la metodología. Luego se describe el proceso de diseño. En el numeral 3 se presenta el protocolo de prueba con los respectivos experimentos y resultados. Por último las conclusiones de la experiencia.

1. TRABAJO PREVIO

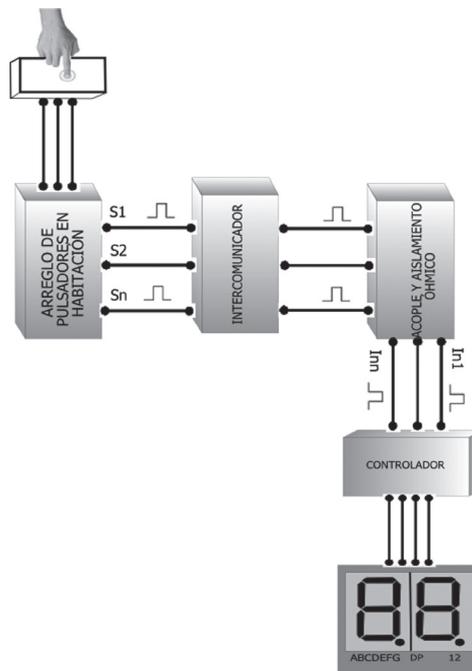
En el mercado actual existen una gran cantidad de intercomunicadores para estaciones de enfermería, estos sistemas involucran una comunicación alámbrica únicamente entre el paciente y la enfermera por medio de un canal de voz, tal como se enseña en [7 - 10] donde se presenta una serie de intercomunicadores donde sus funcionalidades son similares, aunque estos sistemas

presentan un amplio portafolio de servicios (acceso a megafonía, control remoto, control por ordenador etc), la información de la habitación que solicita atención médica no es posible comunicarla al público en general por medio de un indicador, debido a que estos sistema no poseen este requerimiento, lo anterior sugiere que los fabricante de este tipo de tecnología no relacionan al público en general como parte del sistema.

El sistema propuesto en [6] ofrece una solución la cual se enseña en la figura 1. Básicamente el sistema se conforma de un intercomunicador, un controlador, un indicador luminoso y una etapa de acople y aislamiento óhmico cuya función es evitar problemas de compatibilidad magnética al interconectar el intercomunicador con el controlador del sistema.

El funcionamiento del sistema de la figura 1 inicia desde las habitaciones en el momento en que el usuario genera una orden de atención (por medio de un pulsador conectado al intercomunicador). Luego el intercomunicador habilita un canal correspondiente a la habitación que demanda servicio. Esta es recibida por la etapa de procesamiento, la cual codifica y envía la información al modulo de visualización. Finalmente la etapa de visualización enseña al público en general la habitación que solicita servicio médico. Es de notar como esta solución únicamente acopla el intercomunicador con un indicador descartando una posible actualización en la infraestructura en la entidad que requiere la solución.

FIGURA 1. Sistema de instrumentación y medida propuesto en [6].



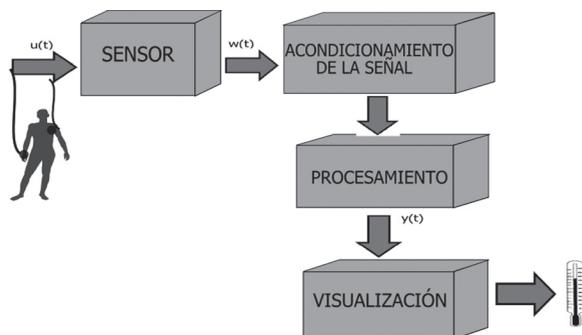
2. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología y el diseño del sistema de instrumentación y medida que se aborda en esta sección, estarán enfocados en enseñar cada una de las etapas y su respectivo diseño preservando algunos elementos planteados en [6].

2.1 MARCO TEÓRICO

Los sistemas de instrumentación y medida fueron creados con el propósito de extraer información del mundo físico. En síntesis los sistemas de medición constan de una etapa de sensor, un módulo de acondicionamiento de señal, un módulo de procesamiento y finalmente la etapa de visualización de resultados (ver figura 2). La señal $u(t)$ corresponde a la variable física de interés. La dimensión física de esta señal puede ser de cualquier naturaleza, mecánica, térmica, magnética, eléctrica, química y óptica. Por otro lado la señal $y(t)$ es la respuesta del sistema originada por la excitación $u(t)$.

FIGURA 2. Modelo de bloques sistema de instrumentación y medida.

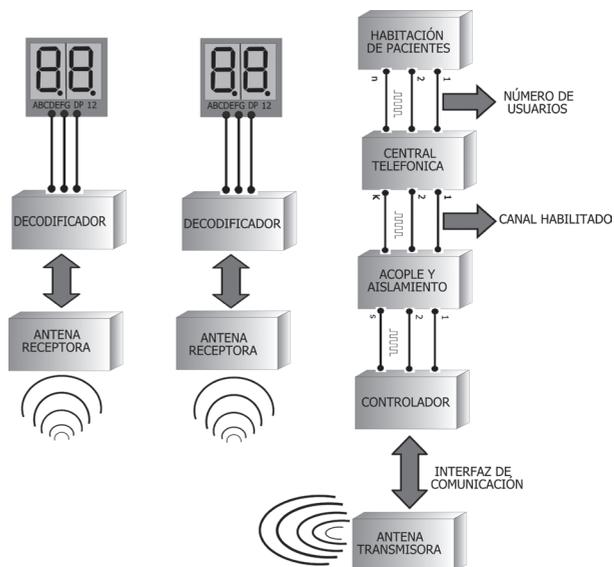


La forma en que opera un sistema de instrumentación y medida es bastante simple. Inicialmente la señal $u(t)$ es transformada por la etapa de sensor en una señal de tipo eléctrico $w(t)$. Posteriormente esta señal es modificada por el módulo de acondicionamiento de señal con el propósito de adecuar (filtrar, amplificar, atenuar, aislar, acoplar) la señal $w(t)$ antes de ser procesada. Luego la señal suministrada por el módulo de acondicionamiento es tratada por la etapa de procesamiento. Este módulo se encarga de realizar las operaciones necesarias (cálculos matemáticos, algoritmos de decisión, codificación y decodificación de datos) a la señal $w(t)$ con el objetivo de inferir el valor de la variable $u(t)$. Por último se tiene la etapa encargada de informar numéricamente el valor de la señal $y(t)$, la cual es equivalente a $u(t)$ [11].

2.2 METODOLOGÍA

El proceso metodológico consiste en diseñar cada una de las etapas de un sistema de instrumentación y medida. El sistema de medición que se propone en el presente documento se enseña en la figura 3. A diferencia del sistema de la figura 1, el sistema propuesto introduce un bloque inalámbrico encargado de reemplazar la conexión física entre la etapa de acondicionamiento y el módulo de visualización por una comunicación a través de señales electromagnéticas. Claramente este cambio elimina la necesidad de transportar cables desde el intercomunicador hasta el lugar donde se instalará el indicador luminoso. Por otro lado, es posible adicionar más indicadores luminosos si se requiere informar en otras salas de espera la solicitud de servicio médico al público en general.

FIGURA 3. Sistema de instrumentación y medida propuesto.



Nótese que la alternativa que se propone en la figura 3 resalta la portabilidad del sistema al eliminar la conexión física entre los módulos antes mencionados. Adicionalmente la instalación del sistema en campo se facilita repercutiendo en los costos de instalación. Por otro lado, la mantenibilidad del sistema se ve beneficiada al sustituir cables de conexión por una antena.

2.3 DISEÑO

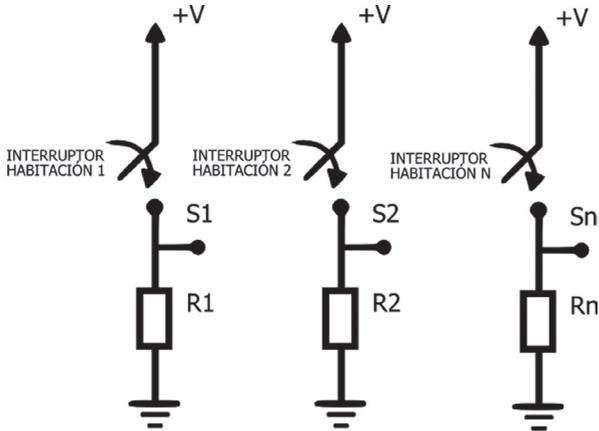
A continuación se diseña cada una de las etapas del sistema propuesto en la figura 3. Empezando por el módulo de sensor y finalizando en la etapa de visualización. Además se especifica los materiales utilizados, los esquemas de

circuito a implementar y los algoritmos (software) que rigen el sistema.

2.3.1 Etapa de sensor

Los centros de salud cuentan usualmente con un dispositivo encargado de medir el evento de llamado al personal de enfermería. Es común encontrarlo al lado donde el paciente se recupera. Cuando el paciente requiere algún servicio médico simplemente presiona el interruptor activando la correspondiente salida {S1, S2,..., Sn} inmediatamente la orden es trasladada al centro de enfermería (intercomunicador). En la figura 4 se enseña un esquema de circuito de la etapa de sensor. Generalmente la orden es desactivada localmente desde el intercomunicador del sistema o también abriendo nuevamente el interruptor desde la sala de recuperación.

FIGURA 4. Modelo red de pulsadores de usuarios.

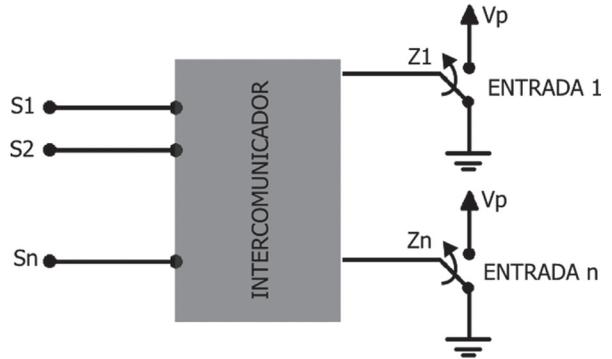


2.3.2 Etapa de acondicionamiento de señal

La etapa de acondicionamiento de señal se conforma por dos elementos. El primero es el intercomunicador. El segundo es el bloque de acople y aislamiento óhmico. El intercomunicador posee varias funciones elementales. En primer lugar permite comunicar a los pacientes y al personal médico por medio de un canal de voz (micrófono) en cualquier instante. En segundo lugar anuncia al personal médico y al público en general que algún paciente demanda atención médica, esta función se realiza a través de una alarma y en tercer lugar activa un canal telefónico con el propósito de informar al centro de enfermería cual es la habitación exacta que demanda servicio médico [12]. Nótese que las dos primeras funciones del intercomunicador no son de interés. Lo anterior sugiere, que únicamente es de relevancia detectar el canal que activa el intercomunicador en un momento dado. Un modelo de circuito que resume el funcionamiento de este elemento se enseña en la figura 5, donde {S1, S2,..., Sn} son las ordenes provenientes

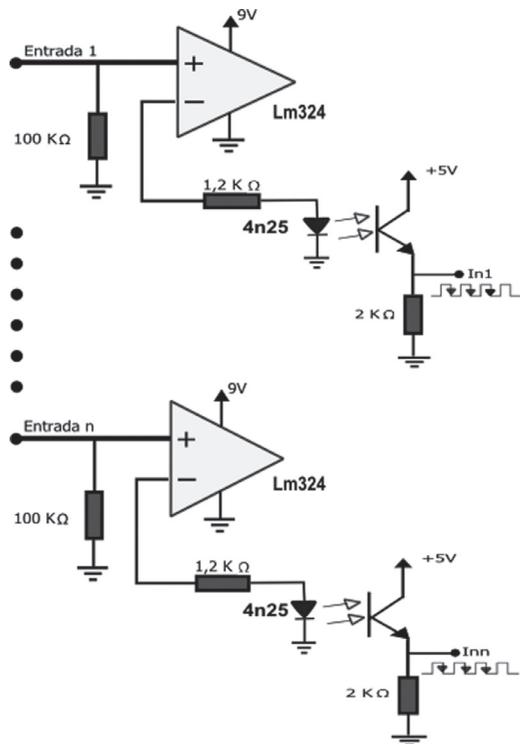
de las salas de recuperación y {Entrada 1,..., Entrada n} son los canales que se activan o desactivan en función de las ordenes {S1, S2,..., Sn}.

FIGURA 5. Modelo a escala de un intercomunicador.



Para acoplar y aislar eléctricamente el intercomunicador de los demás módulos del sistema se utiliza el esquema de circuito que se introduce en [6], el cual se constituye básicamente de amplificadores operacionales y optoacopladores. Este se aprecia en la figura 6, algunas características de interés son: tecnología de fácil acceso, dispositivos de bajo costo, elementos robustos y principio de funcionamiento y diseño relativamente simple.

FIGURA 6. Esquema de circuito etapa de acondicionamiento de señal propuesto en [6].



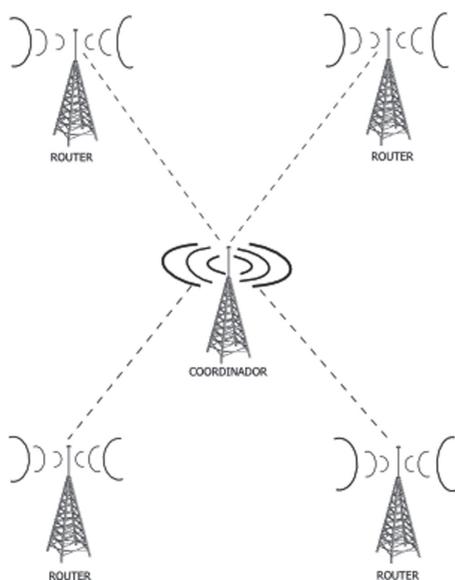
El procedimiento de diseño del circuito anterior consiste en determinar el valor de las resistencias R_d y R_l . El propósito de la resistencia R_d es evitar el fenómeno de saturación del amplificador operacional en el momento en que el terminal no inversor quede sin conexión física con el intercomunicador (por ejemplo entrada de reserva). Por lo tanto se recomienda que el valor R_d sea del orden de los ciento de miles de ohms. Por otro lado el valor de R_l se calcula en función de la corriente de activación del optoacoplador [13] y la disipación de potencia eléctrica por efecto Joule que experimenta R_l al fluir una corriente eléctrica por sus terminales.

2.3.3 Etapa de procesamiento

Adquirir, transmitir, recibir y decodificar (la información enviada por el intercomunicador) son las funciones principales de la etapa de procesamiento. Para iniciar con la etapa de diseño se introduce primeramente la arquitectura de la red inalámbrica. Luego se enseña la tecnología a utilizar y finalmente se enseñan los modelos de circuito.

Teniendo en cuenta que a un mismo intercomunicador se puede conectar simultáneamente varias etapas de visualización se propone la red inalámbrica que se enseña en la figura 7. La cual, se conoce en la literatura como red punto a multipunto [3]. Básicamente está compuesta de un dispositivo coordinador (servidor de la red) y varios Router. La comunicación en este caso es de uno a varios, es decir, toda información transmitida por el coordinador es enviada a todos los Router que conforman la red. Sin embargo los datos transmitidos por el Router convergen únicamente hacia el coordinador del sistema.

FIGURA 7. Esquema red inalámbrica punto a multipunto.

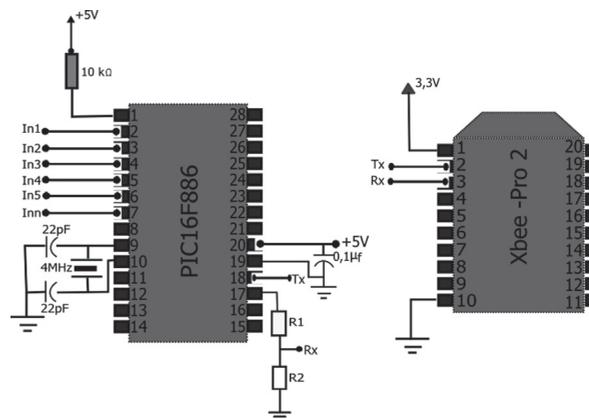


La antena XBee PRO 2, la cual opera bajo el estándar ZigBee, fue seleccionada para actuar como dispositivo coordinador. La selección de esta tecnología se debe a características técnicas y comerciales. Algunas características técnicas de interés se enuncian a continuación [14].

- Alcance en ambientes urbanos desde 60m hasta 100m.
- Puerto de comunicación serial asíncrono (RS232).

Comercialmente es un equipo de fácil acceso, bajo costo y con herramientas computacionales disponibles al público en general gratuitamente. Una alternativa para comunicar la antena XBee PRO 2 con otros dispositivos (microcontroladores, PLC, FPGA) consiste en utilizar el puerto serial asíncrono. El esquema de circuito encargado de adquirir y transmitir la información enviada por el intercomunicador se enseña en la figura 8. Los terminales [In1.....InN] corresponden a las respuestas del circuito de la figura 6. Las resistencias R_1 y R_2 conforman un divisor de voltaje. Estas se calculan para reducir una tensión de 5 a 3.3 Volts, lo anterior es una maniobra necesaria para interconectar los terminales de salida del microcontrolador con los terminales de entrada de la antena XBee PRO 2, los cuales operan a diferentes niveles de voltaje.

FIGURA 8. Diagrama de circuito del coordinador de la red punto a multipunto.



Es de notar que la interfaz de comunicación (ver figura 3) consiste en implementar (por software) el protocolo de comunicación serial RS232. En este caso el elemento de procesamiento es un microcontrolador PIC16F886. La selección de este dispositivo se basa en que posee las características necesarias para garantizar el funcionamiento adecuado del sistema. Las

características básicas que debe poseer el controlador del sistema se describen a continuación.

- Poseer una modulo Transmisor-Receptor Asíncrono.
- Múltiples entradas digitales.

Para conocer en detalle el principio de funcionamiento de la comunicación inalámbrica serial (a través del protocolo RS232) que se propone en la figura 8 el lector puede consultar [3].

Similarmente el diagrama de circuito para las funciones de recibir y decodificar la información (transmitida por el coordinador de red) se enseña en la figura 9. Nuevamente se utiliza un microcontrolador PIC16F886 para la función de decodificación y una antena XBee S2. Sin embargo el microcontrolador debe poseer los siguientes requerimientos.

- Poseer una modulo mejorado Transmisor-Receptor Asíncrono EUSART.
- Poseer modo de bajo consumo energético (modo sleep), así como alternativas para salir de tal modo.
- Causas de interrupciones, por desbordes de temporizadores.
- Poseer múltiples entradas y/o salidas digitales.

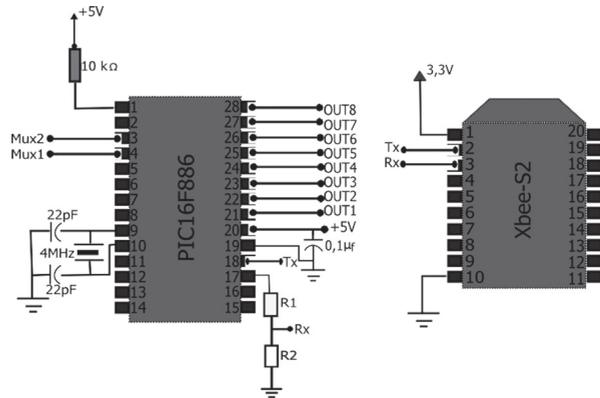
Las dos primeras características son imprescindibles para construir un sistema eficiente. Debido a que con este hardware es posible elaborar un algoritmo que disminuya el consumo energético del equipo.

En el circuito de la figura 9 los terminales [Out1..... Out8] conducen la información decodificada hacia el elemento de visualización. Por otro lado los terminales Mux1 y Mux2 tienen como función controlar el encendido del indicador luminoso [15].

Cabe aclarar que las entradas [In1,..., Inn] y las salidas [OUT1,..., OUT8], Mux1 y Mux2 asignadas de forma arbitraria a los terminales de elemento controlador y decodificador del sistema no afectan la metodología sin embargo se deben respetar los terminales por defecto utilizados para implementar la interfaz de comunicación con la respectiva antena.

Es de notar que la antena coordinadora (XBee PRO 2) difiere en referencia de las antenas receptoras (XBee S2). Esta consideración se realiza con el objetivo de tener mayor alcance en la trasmisión de información.

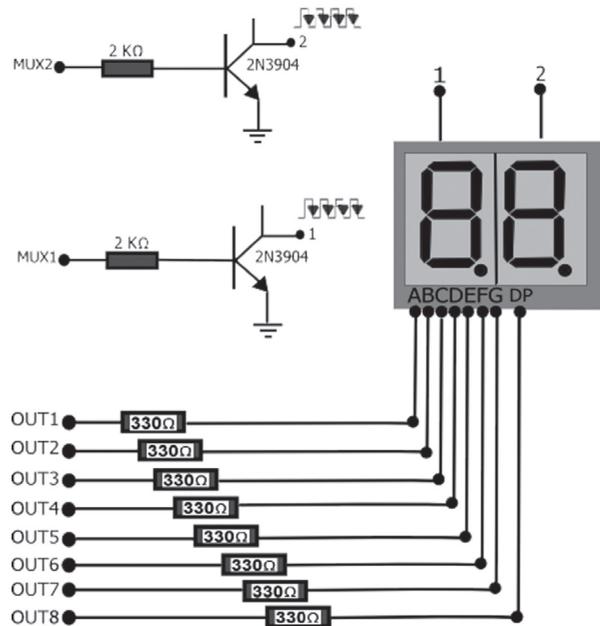
FIGURA 9. Diagrama de circuito del Router de la red punto a multipunto.



2.3.4 Etapa de visualización

La etapa de visualización está conformada por un display cátodo común de doble segmento encargado de indicar el número de la habitación que demanda servicio médico. El diagrama de circuito se enseña en la figura 10, donde se hace uso de una etapa potencia conformada por transistores cuya función consiste en amplificar la corriente de base suministrada por el microcontrolador y así activar el elemento de visualización, la configuración de los transistores de la figura 10 se conoce en la literatura como inversor lógico básico BJT y la versión simplificada corresponde a la compuerta lógica tipo NOT [16]. En [15] se explica en detalle el principio de funcionamiento así como el algoritmo de control del circuito de la figura 10.

FIGURA 10. Diagrama de circuito etapa de visualización.

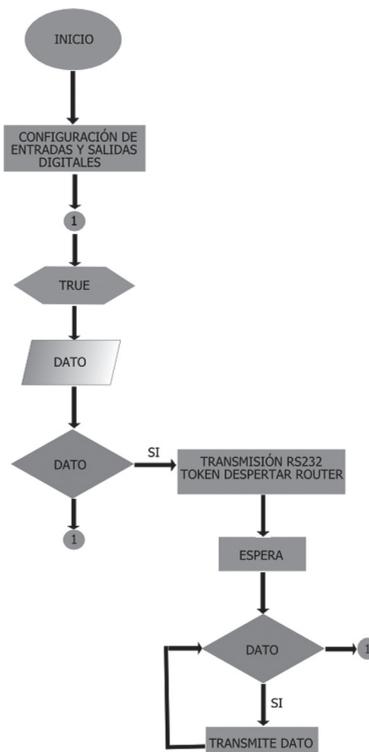


2.3.5 Software

La etapa de procesamiento debe operar bajo el control de un algoritmo. El algoritmo debe implementarse en cada uno de los elementos que conforma esta etapa. En primer lugar se tiene el algoritmo encargado de recibir y transmitir (hacia los dispositivos Router de la red inalámbrica) la información capturada por el intercomunicador. En segundo lugar se tiene el programa encargado de recibir y decodificar la información transmitida por el coordinador de la red. La programación de estos algoritmos fue desarrollada en entorno PIC C, una adaptación del lenguaje C para microcontroladores PIC [15]. En las figuras 11 y 12 se enseña los diagramas de flujo del software desarrollado. Nótese que en el programa de figura 12 se aplica una interrupción por recepción de dato en la EUSART [17]. El objeto de esta técnica consiste en deshabilitar el modo de bajo consumo energético del microcontrolador en el momento en que el coordinador de la red transmita información. Nótese que al introducir una estrategia que combina hardware y software se diseña un sistema que disminuye su consumo energético cuando no existe orden de atención por parte del usuario. Esta característica en el diseño es imprescindible para aumentar el desempeño y la eficiencia del equipo.

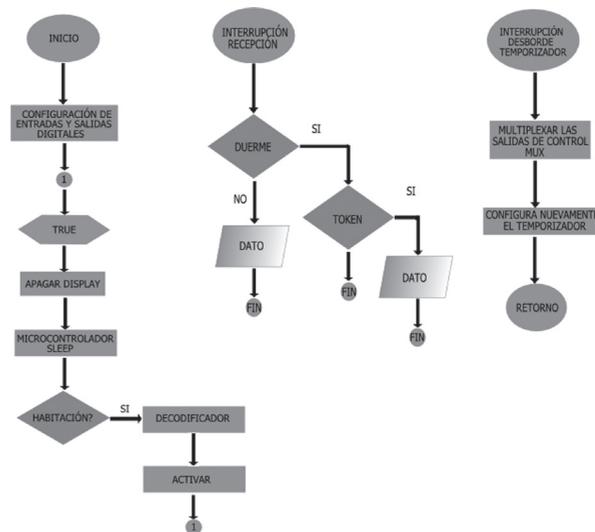
Cabe mencionar que los algoritmos mencionados anteriormente no realizan una atención paralela de las órdenes enviadas por los usuarios, es decir atienden una única orden y las demás quedan en espera. Sin pérdida de generalidad los algoritmos de control pueden ser modificados en función de los requerimientos del cliente final así como las características de la sección donde se instalará el equipo. A modo ejemplo considérese el caso donde sea necesario implementar un algoritmo que vincule prioridades según las habitaciones que demanda servicio médico (sección de urgencias), en este caso es necesario modificar los programas de control, sin embargo la metodología no sufre alteración alguna. Lo anterior sugiere, que los requerimientos particulares tanto del cliente final, así como las características arquitectónicas del hospital o clínica donde se instalará el equipo son variables circunstanciales que influyen tanto en el algoritmo de control y la escalabilidad (números de equipos a instalar) del sistema, por otro lado el sistema presenta una limitante en lo que respecta al número de habitaciones que se puede acoplar al circuito de la figura 8, el cual está en la capacidad de soportar 19 habitaciones en total, si este número no es suficiente una opción consiste en seleccionar otro microcontrolador con más terminales de entradas digitales, sin olvidar que esta máquina debe poseer un módulo de comunicaciones asíncrona en su respectivo hardware.

FIGURA 11. Diagrama de flujo algoritmo para el elemento coordinador de la red.



Por último se tiene el software encargado de programar las antenas XBee con el propósito de construir la red punto a multipunto. Para ello se hace uso del aplicativo X-CTU, la cual, es una herramienta de libre acceso ofrecida por Digi International [18].

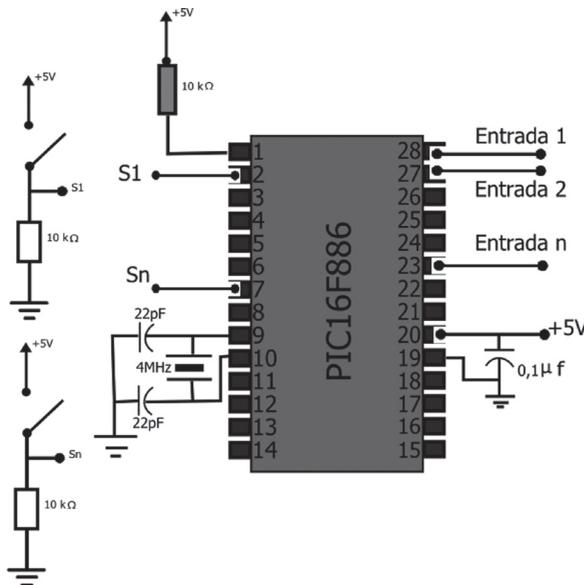
FIGURA 12. Diagrama de flujo algoritmo del elemento Router de la red.



2.4 EMULACIÓN INTERCOMUNICADOR

Debido a que no siempre es posible contar con un intercomunicador para validar la alternativa propuesta. Se hace necesario construir un modelo a escala que reproduzca la característica de interés del intercomunicador. Para ello se utiliza el esquema de circuito que se enseña en la figura 13. En este caso los interruptores y el microcontrolador modelan los sensores y el intercomunicador respectivamente. Así cuando un interruptor es accionado inmediatamente el microcontrolador activa una salida. La duración de esta es equivalente al tiempo en que interruptor permanece accionado. De esta forma se reproduce el funcionamiento del intercomunicador.

Figura 13. Diagrama de circuito emulo intercomunicador.



2.5 FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE POISSON

La distribución de Poisson es una función de probabilidad ampliamente utilizada para modelar el número de eventos que ocurre durante cierto intervalo de tiempo. Matemáticamente se expresa así

$$P(x=k) = \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!} \quad (1)$$

donde $\lambda > 0$ es la tasa de eventos, $t > 0$ es el intervalo de tiempo del proceso o variable continua y $x = [0, 1, 2, \dots, n]$ es la variable aleatoria. La distribución de Poisson queda completamente descrita si se especifica el parámetro que describe la tasa de eventos. Si se conoce el número de eventos ocurridos en el intervalo de tiempo del

proceso este parámetro puede ser inferido aplicando el estimador por máxima verosimilitud, el cual viene dado por la siguiente ecuación (2) [19].

$$\lambda = \frac{\sum_i^n k_i}{nt} \quad (2)$$

donde n corresponde al número de eventos ocurridos en el intervalo t . La probabilidad de que ocurra n eventos (en tal intervalo) se calcula por medio de la función de densidad de probabilidad (ecuación 3).

$$F(t_k < t) = \int_0^t P(x=k) dt \quad (3)$$

Se puede demostrar que la probabilidad de que ocurra al menos un evento en la función de distribución de Poisson es igual a la obtenida si se aplica la función de distribución exponencial, en este caso la ecuación (3) se simplifica y toma la forma de la ecuación (4) [19].

$$F(t_k < t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (4)$$

Por otro lado, la confiabilidad $R(t)$ puede ser calculada así ecuación (5).

$$R(t) = 1 - F(t_k < t) \quad (5)$$

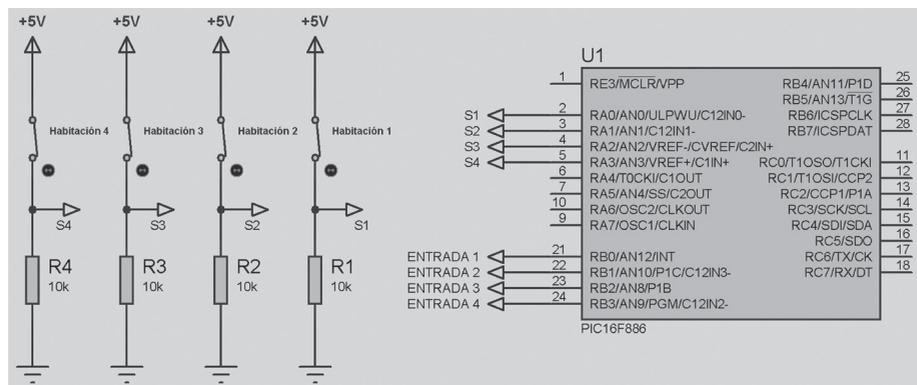
3. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

En esta sección se describe el protocolo de prueba con el objetivo de validar la metodología y el diseño propuesto. Se inicia con la simulación de los esquemas de circuito y de software de control del sistema presentado. Luego se documentan los experimentos realizados al prototipo real.

3.1 SIMULACIÓN

El proceso de simulación fue realizado en la herramienta computacional Proteus versión 7.2. La cual permite simular diferentes tipos de microcontroladores, compuertas lógicas, elementos de la optoelectrónica, circuitos electromecánicos, protocolos de comunicación serial (serial SPI, serial I2C, serial USB, serial RS232) etc. Por lo tanto resulta posible realizar experimentos previos a nivel de software con el propósito de ajustar los algoritmos y parte del hardware del sistema de instrumentación y medida propuesto. En la figura 14.a se enseña el circuito que emula el intercomunicador de la figura 13. Para efectos de experimentos se selecciono cuatro habitaciones. Es de aclarar que la notación utilizada en la figura 14.a sigue siendo consistente a la presentada en la figura 5.

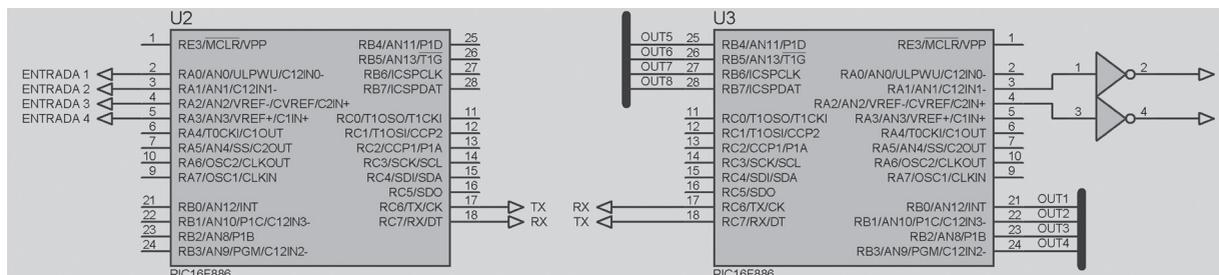
FIGURA 14a. Simulación emulador intercomunicador.



Cuando un canal es habilitado {ENTRADA 1, ENTRADA 2, ENTRADA 3, ENTRADA 4}, la orden es conducida al controlador del sistema para posteriormente ser transmitida por el coordinador a cada uno de los Router de la red. Esta operación se presenta en la figura 14.b, donde el microcontrolador de lado izquierdo representa al controlador del sistema y el restante representa al elemento decodificador. Si bien en el software de simulación no existe un dispositivo que emula a la

antena XBee Pro esta puede ser modelada como una comunicación serial asíncrona entre el controlador y el decodificador por medio de los terminales {TX, RX}. Así cuando un dato es transmitido por el controlador del sistema este es recibido por el decodificador a partir del puerto serial asíncrono. Es de aclarar que en estas pruebas no se tuvo en cuenta la etapa de acople y aislamiento óhmico debido a que no influye en el desarrollo de la simulación.

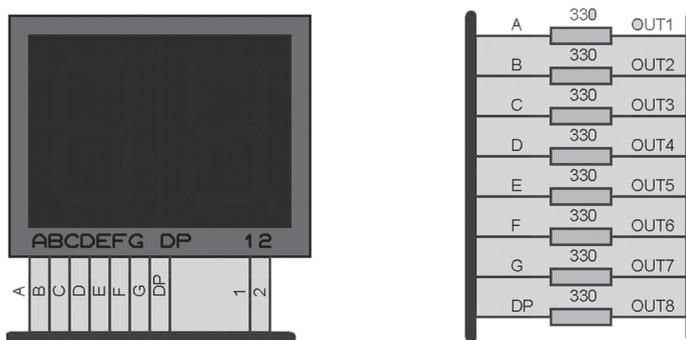
Figura 14.b. Simulación controlador y decodificador del sistema.



La etapa de visualización se adjunta conjuntamente en las figuras 14.b y 14.c. En la figura 14.b se presenta las salidas de control del indicador luminoso {OUT1,....., OUT 8, 1, 2}. Es de notar que los transistores de la

figura 10 son modelados por su homologo la compuerta lógica NOR. Por otro lado en la figura 14.c se presente el display de cátodo común utilizado para informar la solicitud de atención médica por parte del usuario.

Figura 14.c. Simulación controlador y decodificador del sistema.



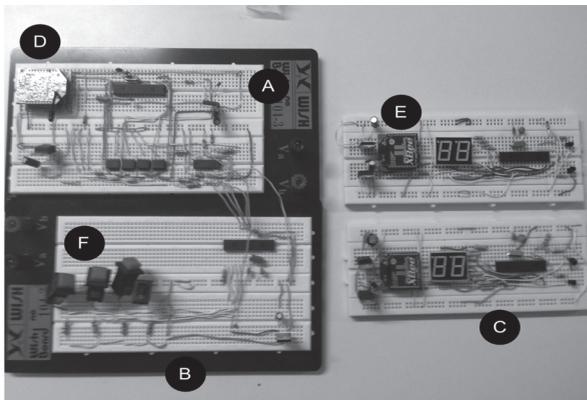
La simulación permite realizar ajustes y pruebas a los programas elaborados para los microcontroladores. Concretamente se pueden realizar todo tipo de experimentos con el propósito de poner a punto los programas antes de proceder con el montaje físico del sistema. De esta forma es posible validar los algoritmos propuestos así como la metodología presentada en la figura 3.

3.2 EXPERIMENTOS PROTOTIPO REAL

Debido a que no siempre es posible instalar el equipo en un hospital y que en tal caso sería necesario poseer alguna forma de cuantificar el desempeño del prototipo. Lo anterior sugiere realizar pruebas en un ambiente similar al de un hospital (con corredores, flujo de personas, obstáculos, muros, rede eléctricas, de comunicaciones, señales inalámbricas WI-FI, contaminación magnética) con el propósito de evaluar las prestaciones del sistema propuesto. Por tal razón se realizaron algunas pruebas en las instalaciones del edificio de ingeniería eléctrica de la UTP, el cual reúne las características antes mencionadas para realizar experimentos preliminares.

Definido el lugar de prueba se elaboró una red punto a multipunto con 2 Router y finalmente se emuló físicamente un intercomunicador de 4 canales. Estos circuitos se enseñan en la figura 15.

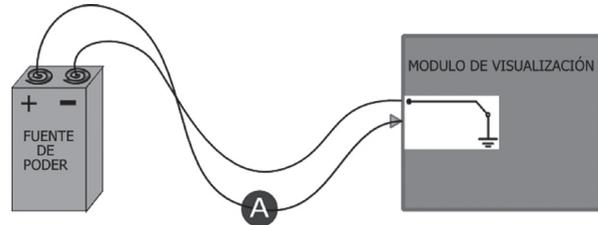
FIGURA 15. Prototipo propuesto. Donde A es la tarjeta que emula el intercomunicador; B es la tarjeta de acondicionamiento y procesamiento; C es la tarjeta de visualización; D es la antena coordinadora; E antena Router y F red de pulsadores que emula la entrada del sistema.



Los experimentos se realizaron desde dos enfoques, el primero consiste en evaluar el funcionamiento del sistema (distancia, consumo energético del sistema, determinación de punto calientes, etc) en un ambiente

similar al de un hospital y el segundo lugar, cuantificar el desempeño con el propósito de evaluar la confiabilidad del sistema en su totalidad y así evaluar la estrategia presentada en el diagrama de flujo de la figura 12.

Figura 16. Circuito de medida de consumo de energético del modulo de visualización, donde A indica amperímetro.



El circuito utilizado para cuantificar el consumo energético del modulo de visualización se enseña en la figura 16 donde básicamente se adiciona un amperímetro conectado en serie entre la fuente de poder y el modulo de visualización. Los resultados obtenidos se enseñan a continuación (tabla 1).

TABLA 1. Resultados de alcance y consumo energético modulo de visualización.

Experimento	Distancia (m)	Consumo Operación (mA)	Consumo Sleep (mA)
1	4.6	65	48
2	12.1	70	48
3	23.9	70	48
4	41.1	70	48

Durante el desarrollo de este experimento no se detectaron reinicios del sistema, interferencias, sin embargo se detectó calentamiento en los reguladores de voltaje cuando el sistema se deje encendido por largo períodos de tiempo (lo cual es un requerimiento obligatorio) aunque este inconveniente fue superado acoplado disipadores de calor a los respectivos reguladores.

En segundo lugar para cuantificar la pérdida de paquetes, se diseñó un experimento aleatorio de envío de datos, transmitiendo 100 paquetes a los modulo receptores de la red, con el fin, de determinar la tasa de pérdida de información. En la tabla 2 se observa los paquetes promedio que llegaron a los modulos receptores para diferentes distancias. Naturalmente al aumentar la distancia la tasa de pérdida de paquetes aumenta.

TABLA 2. Resultados de cantidad de paquetes perdidos en función de la distancia.

Distancia [m]	Paquetes recibidos (%)
12.5	100 ± 0
17.3	98.3 ± 1.9
27.5	91.5 ± 4.5
34.7	13.3 ± 2.5

Para el cálculo de confiabilidad del sistema se realizó un experimento aleatorio de 400 envíos de solicitudes de atención y se contó la cantidad de ocasiones que el equipo falló, lo anterior se refiere al número de veces en que no fue posible mostrar en alguno de los módulos de visualización el mensaje enviado por el coordinador de la red. El experimento se realizó durante 4 días, tiempo en el cual se variaba las ubicaciones de los dispositivos por día. El experimento anterior deseaba recrear la disponibilidad del sistema en función de la distancia

El resultado del experimento evidenció que el equipo en 400 órdenes de atención, no fue posible mostrar en una ocasión la habitación que demanda servicio médico. De esta forma dado el número de fallas y el tiempo de duración del experimento resulta posible modelar la tasa de fallo como un proceso aleatorio de Poisson. Donde el parámetro λ se calcula haciendo uso de (2), luego se calcula la probabilidad de que ocurra un fallo y la confiabilidad haciendo uso de (4) y (5), los resultados se enseñan en la tabla 3.

TABLA 3. Resultados cálculo de confiabilidad a través del proceso de Poisson.

Tiempo (meses)	F(t_k<t) (%)	R(t) (%)
1	1.86	98.14
2	3.68	96.32
6	10.75	89.25
12	20.4	79.6

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Si bien el consumo energético del prototipo puede diferir del sistema final implementado en campo (display de mayores dimensiones, transistores de mayor potencia) los resultados muestran que la estrategia implementada a nivel de software permite disminuir el consumo energético del módulo de visualización, la cual es independiente de las características eléctricas del hardware (transistores y displays).

Los resultados muestran que el prototipo está en la capacidad de transmitir, recibir (vía inalámbrica) y mostrar la información al público en un ambiente

urbano permitiendo adicionar módulos de visualización por medio de la red punto a multipunto, esto elimina el uso de conductores y los problemas ocasionados por una posible falla de estos. Adicionalmente el prototipo posee una característica adicional y es la modularidad (módulo acondicionamiento y/o procesamiento y módulo de visualización) esta propiedad no sólo facilita el mantenimiento del sistema sino que permite construir un sistema portátil y flexible potencializando la instalación del equipo.

Los resultados muestran que a pesar de que existe pérdida de información (sin violar la distancia máxima) el sistema aún es confiable, lo anterior se debe a que únicamente es necesario que la etapas de visualización reciban un paquete para enseñar la habitación que demanda servicio médico, por lo tanto al producirse una solicitud de atención el coordinador debe enviar varios mensajes a los Router, de este modo aumenta la confiabilidad del equipo. Ahora, si bien la probabilidad de falla en un año es significativa, esta debe entenderse no como un daño físico en el equipo si no, como la probabilidad de que no enseñe por primera vez la orden de atención en alguno de los equipos de la etapa de visualización que conforman la red punto a multipunto.

Basados en la metodología el sistema propuesto no implica una reforma tecnológica o arquitectónica de la entidad donde se instalará, debido a que el sistema se acopla a la central y se acomoda a los requerimientos técnicos del cliente, esta propiedad es sumamente importante en situaciones donde los recursos son ilimitados y donde las reformas físicas del hospital o clínica no son posibles.

Finalmente como trabajo futuro resulta de interés determinar el desempeño del prototipo en las instalaciones de un centro hospitalario, con el propósito de evaluar el funcionamiento y la confiabilidad frente a una dinámica real. Otros aspectos pueden ser abordados, por ejemplo estudiar las interferencias que el sistema puede ocasionar a otros equipos del hospital así como la susceptibilidad del prototipo frente a señales electromagnéticas presente en el medio ambiente (WI-FI).

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al grupo de investigación GIIE-UTP por el apoyo recibido durante el desarrollo de la experiencia.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Zhiyuan GAO, Yingju JIA, Hongwei Z, Xiaohui LI (2012). A Design of Temperature and Humidity Remote Monitoring System based on Wireless Sensor Network Technology. Conference on Control

- Engineering and Communication Technology, 896 – 899, IEEE. Liaoning China. ISBN 978-1-4673-4499-9
- [2] Ning W, Naiqian Z, Maohua W (2006). Wireless sensors in agriculture and food industry—Recent development and future perspective. *Computers and Electronics in Agriculture*, 50(1), 1-14. ISSN 0168-1699.
- [3] Faludi R (2011). *Building Wireless Sensor Networks*. USA: O'REILLY.
- [4] López JA, Fulgencio Soto AI, Sánchez P, and Suardíaz J (2010). Design and Implementation of a Wireless Sensor Network for Precision Horticulture. *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*. 29. 27-42. ISSN 1867-8211.
- [5] Romero Acero A, Marín Cano A, Jiménez Builes JA (2013). Red de sensores inalámbricos para el monitoreo de alertas tempranas en minas subterráneas: una solución a la problemática de atmósferas explosivas en la minería de carbón en Colombia. *Revista Ingeniería y Desarrollo*. 31(2), 227 – 250.
- [6] Henao Baena CA, Cano Garzón HB (2014). Diseño e implementación de un sistema de instrumentación y medida para la atención hospitalaria. *Revista Ingenium*, 8(22), 45 – 51.
- [7] Datasheet Intercomunicador para hospitales / clínicas NHX. Grupo de Ingenieros Komatsu. Recuperado de: <http://www.grupokomatsu.com/sites/default/files/products/NHX-CATA2010.pdf>
- [8] Intercomunicador anti vandálico pabellón de celdas Expander IC19. Intercron. Recuperado de: <http://www.intercron.com/intercom08-2.html>
- [9] Intercomunicadores marca SMC. Optimus Sonido y Comunicación. Recuperado de: <http://www.optimus.es/pdfnov/cat%C3%A1logo%20SMC%202007.pdf>
- [10] Intercomunicador principal modelo NEM-30A/C. Primex. Recuperado de: <http://www.primex-ltda.com/index.php/nuestros-productos/comunicacion/intercomunicacion/hospitales-y-clinicas/nem-30a-c-detail>
- [11] Pallas Areny Ramón (2001), *Sensores y Acondicionadores de Señal*. Tercera edición. España: Alfaomega.
- [12] Dumed (s.f). Nurse call system. Operation manual. Recuperado de: <http://www.commax.vn/catalog/download/Commax%20Nurse%20Call%20System.pdf>
- [13] Vishay (2010). 4N25, 4N26, 4N27 and 4N28 Optocoupler data-sheet. Malvern, PA: Vishay
- [14] Digi International Inc, Hoja de datos XBee®/XBee-PRO® RF Modules. Recupetado de: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Wireless/Zigbee/XBee-Datasheet.pdf>.
- [15] Henao Baena CA, Gallego HA. & Ardila W. (2010). Libro guía para el estudio de las interrupciones. Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira.
- [16] Adel S Sedra. Kenneth C Smith (2000). *Circuitos Microelectrónicos*. Cuarta Edición. Santa Catalina Atzacapotzalco, Mexico: Oxford University Press.
- [17] Microchip (2007). PIC16F882/883/884/886/887 Data-Sheet. Chandler, AZ: Microchip Technology.
- [18] Digi International. (2015), X-CTU Program, versión 5.2.8.6. [Programa de computador]. USA.
- [19] Carlos Julio Zapata. Aplicaciones del proceso de poisson en confiabilidad. *Scientia et Technica*. Número 20. 2002. Recuperado de: <http://academia.utp.edu.co/planeamiento/files/2014/01/cjz-artst1-proceso-poisson.pdf>