UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Trabajo previo a la Obtención del Título de:

INGENIERO ELECTRÓNICO.

TEMA:

DISEÑO Y DESARROLLO DE ACTUADORES DE ILUMINACIÓN PARA UNA RED ZIGBEE CON UN SERVIDOR WEB MONTADO EN RASPBERRY PI.

AUTORES:

PAÚL ESTEBAN ARPI COELLAR.

MARTÍN VINICIO URGILÉS FERNANDEZ.

DIRECTOR:

ING. DIEGO CHACÓN.

CUENCA - ECUADOR

2015

.

Ing. Diego Chacón Mdhd.

Certifica:

Que el trabajo intitulado ***"Diseño y Desarrollo de Actuadores de Iluminación para una Red Zigbee con un Servidor Web Montado en Raspberry Pi."***, realizado por Paúl Esteban Arpi Coellar y Martín Vinicio Urgilés Fernandez, cumple exitosamente con todos los objetivos trazados.

Cuenca, Febrero 2015

Ing. Diego Chacón Mdhd.

DIRECTOR DE TESIS

.

Declaratoria de Responsabilidad

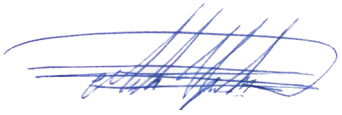
Las ideas, resultados y conclusiones contenidas en esta tesis ***"Diseño y Desarrollo de Actuadores de Iluminación para una Red Zigbee con un Servidor Web Montado en Raspberry Pi."***, son exclusiva responsabilidad de los autores. Declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Universidad Politécnica Salesiana, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Cuenca, Febrero 2015

Paúl Esteban Arpi Coellar

AUTOR



Martín Vinicio Urgilés Fernandez

AUTOR

.

Dedicatoria

A mis padres, Miguel y Lucila, a mi hermana Andrea y a mi tío Pedro, sin todo el apoyo y los consejos que he recibido de ustedes a lo largo de mi carrera nada de esto sería posible. Por esto y mucho más este esfuerzo y logro personal se lo dedico a ustedes.

Paúl

.

Dedicatoria

Se lo dedico a mis padres Marcelo y Alba, a mis hermanos Cristhian y Andrea, su confianza y apoyo fueron el pilar fundamental para alcanzar esta meta, también a las personas que siempre confiaron en mi, ya que sus palabras de aliento me mantuvieron encaminado hacia la meta.

Martín

.

Agradecimientos

Primeramente agradezco a Dios por darme la oportunidad y la fuerza necesarias para llegar a este punto de mi desarrollo tanto personal como profesional, siempre con la convicción de dar lo mejor de mi y sacar lo mejor de cualquier situación. Agradezco a mis padres, Miguel y Lucila, quienes han sido mi gran ejemplo a seguir, mi incondicional apoyo frente a cualquier calamidad y mi mas grande orgullo en todo momento. A mi hermana Andrea por siempre estar ahí para mi y ser un respaldo en todas las áreas de mi vida.

Mi mas sinceros agradecimientos a todos los docentes y personal perteneciente a la Universidad Politecnica Salesiana quienes han sido participes de este gran logro.

Paúl

.

Agradecimientos

Agradezco primeramente a Dios por haberme brindado fortaleza y guía a lo largo del camino, por haberme bendecido con una familia a la cual le estaré eternamente agradecido, a mis padres, Marcelo y Alba, quienes fueron la principal fuente de ejemplo, apoyo y guía en todo momento, siempre alentándome a trazar y cumplir mis metas, agradezco también a mis hermanos Cristhian y Andrea, quienes siempre estuvieron en las buenas y las malas conmigo para aconsejarme y ayudarme en todo.

En fin agradezco a todas las personas que estuvieron en mi vida, ya sea apoyándome o brindándome lecciones, para mejorar y aprender cada día, a los docentes de la Universidad Politécnica Salesiana, quienes me brindaron el conocimiento necesario para llegar a este punto.

Martín

Resumen

En los últimos años, la demanda por sistemas de automatización se ha ido incrementando en sobremanera principalmente por las ventajas que anteriormente eran propias de sistemas de tipo industrial. El avance de nuevos protocolos de bajo costo, elementos de red open source y la incesante disminución de precios en ordenadores personales hace posible que se pueda implementar sistemas de automatización de alto nivel diseñados específicamente para domicilios qué, si bien no necesitan mayor complejidad en sus sistemas, se pueden extender a varias áreas de control; comparables con una industria de pequeña o mediana escala.

La aparición de empresas y fundaciones dedicadas al desarrollo tecnológico independiente tales como Raspberry Pi Foundation, junto con el desarrollo de nuevos protocolos de comunicación inalámbrica junto con módulos dedicados a los mismos, permiten que una implementación domótica sea accesible para el consumidor promedio que no puede acceder a los actuales sistemas de punta en automotización domiciliaria principalmente por el gran coste que significa. Muchas veces estos sistemas tienden a ser altamente restrictivos y no permiten al usuario aprovechar el potencial extra que poseen en sus equipos por eso se vio necesario utilizar recursos abiertos tanto de software (Open Source) como de hardware (Open Hardware) para desarrollar un sistema de automatización de bajo costo y que sea facilmente adaptable a cambios o a modificaciones requeridas por el usuario.

Respecto a la tecnología ZigBee, se ha visto en los últimos años un creciente consumo en las áreas de automatización debido a que al ser un protocolo de baja tasa de datos tiene un bajo consumo de energía; lo cual lo hace un candidato perfecto para aplicaciones en las cuales no es posible tener una fuente de alimentación fija.

En el presente documento se presenta el prototipo de un sistema que aprovecha las ventajas antes mencionadas, enfocado principalmente al control demótico de luces, además refleja un punto de partida para el desarrollo de mas aplicaciones eficientes, de bajo costo y consumo energético.

El prototipo esta conformado por tres dispositivos: el coordinador montado en Raspberry Pi, el enrutador y el actuador de iluminación, los cuales se interconectan inalám-

bricamente a través del protocolo ZigBee.

El Raspberry Pi cumple la función de Gateway, para poder controlar el sistema por medio de un entorno web que puede ser ingresado por medio de cualquier dispositivo que posea un explorador web ya sea desde la red de área local como desde internet.

La seguridad del sistema es algo primordial, por lo que para el acceso web se necesita de un usuario y contraseña, y dentro del sistema ZigBee, los parámetros de direccionamiento y el ID de la red de área personal hacen del sistema muy robusto en cuanto a este tema.

Los tres dispositivos que conforman el sistema fueron diseñados de tal manera que permitan una fácil instalación, un bajo consumo energético y un costo menor comparado a los dispositivos existentes en el mercado.

Contenidos

1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS **1**

1.1 Raspberry Pi 1

1.1.1 Raspbian 2

1.1.2 Phyton 3

1.2 ZigBee 3

1.2.1 Pila de Capas ZigBee 4

1.2.2 Tipos de Dispositivos ZigBee 4

1.2.3 PAN ID 6

1.2.4 Red de Automatización Domiciliaria ZigBee 6

1.2.5 Estándar IEEE 802.15.4-2006 7

1.3 Módulos XBee 10

1.3.1 Funcionamiento del Módulo XBee como Coordinador con el protocolo ZigBee 11

1.3.2 Funcionamiento del Módulo XBee como Enrutador con el protocolo ZigBee 13

1.3.3 Funcionamiento del Módulo XBee como Dispositivo Final con el protocolo ZigBee 14

2 DISEÑO **17**

2.1 Red ZigBee 17

2.1.1 Coordinador 22

2.1.2 Enrutador 25

2.1.3 Dispositivo Final 28

2.2 Actuador de Iluminación 31

2.2.1 Esquema Multifilar 32
2.3 Servidor Web montado en Raspberry Pi 34
2.3.1 Página Web 35
2.3.2 Base de Datos 38
2.3.3 Conexión con la Red ZigBee 40

3 PRUEBAS **43**
3.1 Prueba Red ZigBee 43
3.1.1 Establecimiento de la Red ZigBee 43
3.1.2 Envío de Paquetes de Prueba 45
3.2 Pruebas de Hardware 46
3.2.1 Prueba de Establecimiento de la Red ZigBee 46
3.2.2 Pruebas de Alcance y Distancias Máximas 47
3.3 Pruebas del Actuador de Iluminación 53
3.3.1 Pruebas Generales 53
3.3.2 Prueba de Rendimiento 53
3.4 Pruebas del Servidor Web 55
3.4.1 Pruebas de Acceso 55
3.5 Pruebas del Sistema Final 58
3.5.1 Pruebas de Conectividad Y Establecimiento de Red 59
3.5.2 Prueba de Administrador 60
3.5.3 Prueba de Usuario 60
3.6 Estudio Financiero 62
3.6.1 Detalle de Costos 63
3.6.2 Estudio de Rentabilidad 66

4 Conclusiones y Recomendaciones **69**

5 Anexos **78**

Capítulo 1

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

1.1. Raspberry Pi

Promovida por la fundación del mismo nombre, del tamaño de una tarjeta de crédito y capacidad de operar con Linux, Raspberry Pi es una de las maravillas modernas de la computación, sus aplicaciones y capacidades incluyen desde conexiones USB hasta la reproducción de video en alta definición. Desde su lanzamiento en febrero de 2012 ha presentado 3 versiones diferentes, de las cuales las más conocidas han sido el Modelo A (256 Mb con USB) y el Modelo B (512 Mb con 2 USB y Ethernet), se les puede incorporar diferentes periféricos hasta el punto de ser un ordenador personal de muy buenas prestaciones a un muy bajo costo. Dichas características técnicas y su pequeño tamaño lo hacen un candidato muy útil al momento de realizar aplicaciones de automatización domiciliaria reemplazando el uso de un computador de tamaño común para realizar el mismo trabajo. Una de sus principales ventajas radica en que debido a su pequeño tamaño se le puede conectar periféricos de automatización tales como sensores y cámaras que, a pesar de ser piezas simples de tecnología, requieren de complejos controladores de software para funcionar. El hecho de que soporte software de código abierto (Open Source) permite a desarrolladores e investigadores una mayor libertad al momento de crear aplicaciones con el mismo. [Garzón, 2010]

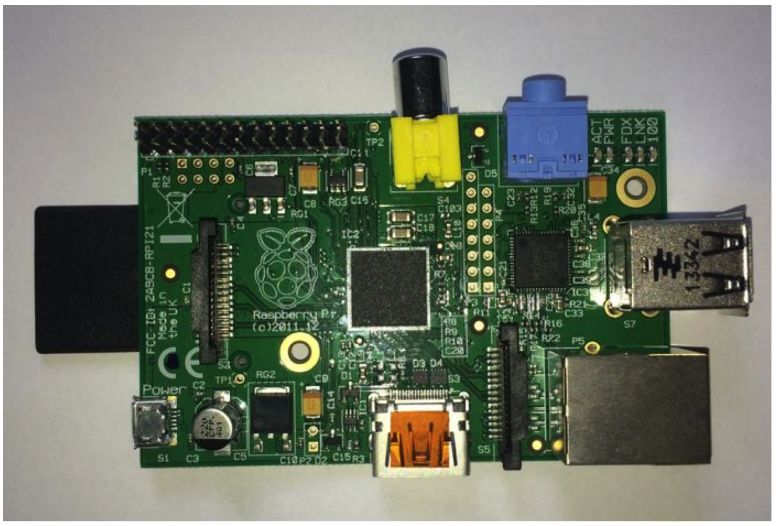


Figura 1.1: Raspberry Pi Modelo B. Fuente: Los Autores.

A continuación se muestra las especificaciones referentes al Modelo B de Raspberry Pi.

Descripción	Raspberry Modelo B
SoC	Broadcom BCM2835 (CPU + GPU + DSP + SDRAM + puerto USB)
CPU	ARM 1176JZF-S a 700 MHz (familia ARM11)
GPU	Broadcom VideoCore IV
Juego de Instrucciones	RISC 32 bits
Memoria	512 MiB SDRAM (Compartido con GPU)
Almacenamiento	SD/MMC/SDIO
Puertos USB 2.0	2
Entradas de Video	MIPI CSI para módulo de cámara RPF
Salidas de Video	RCA, HDMI, Interfaz DSI para LCD
Salida de Audio	Conector 3.5mm., HDMI
Red	10/100 Ethernet RJ45
Periféricos de Bajo Nivel	8xGPIO, SPI, I2C, UART
Consumo	700mA, 3.5W
Fuente de Alimentación	5V por Micro USB o GPIO Header
Sistemas Operativos	GNU Llinux Debian (Raspbian), Fedora (Pidora), Arch Linux ARM, Slackware Linux, RISC OS
Dimensiones	85.60mm x 53.98mm

Cuadro 1.1: Características Técnicas Raspberry Pi Modelo B. Fuente: Fundación Raspberry.

1.1.1. Raspbian

Raspbian es una distribución libre de GNU linux basado en Debian 7.0 o Debian Wheezy optimizado para las capacidades y alcances de los módulos Raspberry Pi, su lanzamiento oficial fue en junio de 2012 y junto con el sistema operativo provee software preinstalado para facilitar el uso del mismo. El sistema operativo ha sido adaptado para el procesador ARMv6 de Raspberry Pi con un soporte optimizado para cálculos en coma flotante por hardware, permitiendo al módulo RPi ser más eficiente con el uso de sus limitados recursos. En ésta distribución se presenta el uso de Midori como navegador web y LXDE como escritorio unto con herramientas de desarrollo como IDLE para el uso de Python. Un punto importante que fue desarrollado específicamente para este caso es el menú raspi-config que permite al usuario configurar el sistema operativo sin necesitar modificar archivos de configuración de forma manual, este menú permite: Configurar la partición root en la tarjeta de memoria, configuraciones de idioma, gestión de usuario, configuraciones de periféricos, configuración de ssh, realizar un overclock al procesador, entre otros. [Elinux, 2012]

1.1.2. Phyton

Python es un lenguaje de programación multi paradigma orientado a la fácil lectura del código que permite a los programadores utilizar varios estilos de programación tales como: programación orientada objetos, programación imperativa y programación funcional. Python utiliza el tipado dinámico y conteo de referencias para la administración de la memoria. Una importante característica es el enlace dinámico de métodos, el cual, enlaza un método y un nombre de variable durante la ejecución de un programa. La versatilidad existente en los scripts de Python lo hacen un excelente candidato al momento de automatizar la ejecución de tareas previamente programadas para un ambiente de ejecución específico las cuales pueden ser de varios tipos tales como: aplicaciones de software, paginas web dentro de un navegador web, sistemas embebidos,

entre otros. Al permitir definir rápidamente funciones dentro de un archivo, se tiene que Python es un útil lenguaje para realizar scripts de código ya que es importante que en este estilo de programación se tenga una fácil comprensión y creación de código, dado que estos llegan a ser secciones relativamente cortas de código orientado a una función específica además de evitar que el usuario se preocupe por tipos de variables y manejo de la memoria. [Anders, 2011]

1.2. ZigBee

Es un estándar mundial libre desarrollado por un consorcio de varias empresas que conforman la Alianza ZigBee, entre ellos se hallan más de 300 miembros entre constructores de semiconductores, de módulos, desarrolladores de software, entre otros. Construido en base al estándar IEEE 802.15.4 MAC/PHY que define una capa de red sobre las capas de IEEE 802.15.4 para soportar capacidades de enrutamiento en redes tipo malla. [Digi International Inc., 2014]

1.2.1. Pila de Capas ZigBee

Está formada de cinco capas, técnicamente una capa marco de aplicación existe pero se agrupa junto con una existente APS (Application Support Sublayer). A continuación se muestra la pila de capas ZigBee. [Digi International Inc., 2014]

Capa ZigBee	Descripción
PHY	Define el funcionamiento de la capa física del dispositivo ZigBee incluyendo: sensitividad del receptor, denegación de canal, potencia de salida, número de canales, modulación de chip y especificaciones de la tasa de transmisión. La mayoría de aplicaciones ZigBee trabajan en la banda reservada ISM 2,4GHz a una tasa de datos de 250kbps.
MAC	Maneja las transacciones de datos de radiofrecuencia entre dispositivos cercanos, incluye servicios tales como el reintento de transmisión y gestión de reconocimiento, junto con técnicas para evitar colisiones como CSMA-CA.
Red	Añade capacidades de enrutamiento que permiten los paquetes de datos de radiofrecuencia atravesar varios dispositivos para enrutar la información desde la fuente hacia el destino.
APS	Capa de aplicación que define varios objetos de direccionamiento, incluidos perfiles, grupos, y los puntos finales.
ZDO	Capa de aplicación que proporciona las características del dispositivo y de descubrimiento de servicios y capacidades avanzadas de administración de red.

Cuadro 1.2: Pila de Capas ZigBee. Fuente: Digi International Inc.

1.2.2. Tipos de Dispositivos ZigBee

1.2.2.1. Coordinador

El coordinador posee las siguientes características:

- Selecciona un canal y un PAN ID para iniciar la red.
- Permite a los enrutadores y dispositivos finales unirse a la red.
- Se debe mantener alimentado por la red eléctrica ya que no puede entrar en modo de reposo.
- Puede almacenar paquetes de datos de radiofrecuencia para dispositivos finales en reposo.

Figura 1.2: Símbolo del Coordinador. Fuente: Los Autores.

1.2.2.2. Enrutador

El enrutador posee las siguientes características:

- Debe unirse a una red PAN ZigBee antes de poder transmitir, recibir ó enrutar información.
- Luego de unirse a una PAN, puede permitir a enrutadores y dispositivos finales unirse a la red.
- Luego de unirse a una PAN, puede asistir en enrutar información.
- Se debe mantener alimentado por la red eléctrica ya que no puede entrar en modo de reposo.
- Puede almacenar paquetes de datos de radiofrecuencia para dispositivos finales en reposo.

Figura 1.3: Símbolo del Enrutador. Fuente: Los Autores.

1.2.2.3. Dispositivo Final

El dispositivo final posee las siguientes características:

- Debe unirse a una red PAN ZigBee antes de poder transmitir, recibir información.

- No puede permitir que dispositivos se unan a la red.
- Debe siempre transmitir y recibir información de radiofrecuencia desde su dispositivo padre, no puede enrutar información.
- Puede entrar en modos de bajo consumo para conservar energía y pueden ser alimentados por baterías.

Figura 1.4: Símbolo del Dispositivo Final. Fuente: Los Autores.

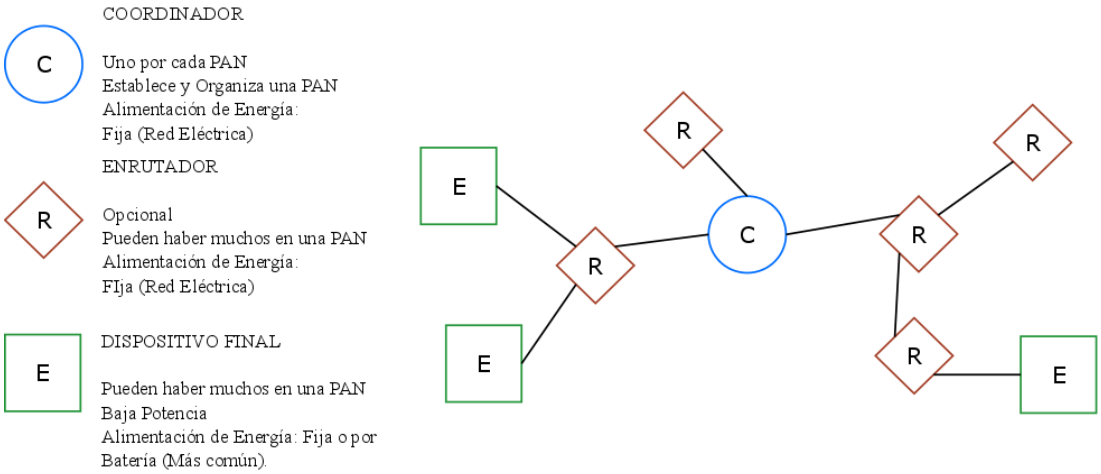


Figura 1.5: Ejemplo de Topología de Red ZigBee. Fuente: Los Autores

1.2.3. PAN ID

PAN es el acrónimo para Personal Area Network o en español Red de Área Personal, toda red ZigBee es PAN por lo que se establece un identificador único para cada red. El PAN ID es común para los dispositivos dentro de la misma red, dichos dispositivos ZigBee pueden tener un PAN ID previamente configurado o descubrir las redes que se encuentran cerca y escoger un PAN ID para unirse. [Digi International Inc., 2014]

1.2.4. Red de Automatización Domiciliaria ZigBee

Las redes de automatización domiciliaria ZigBee o ZHA (ZigBee Home Automation) se escalan desde 2 a 500 nodos, son instaladas fácilmente por los propietarios de las viviendas o por profesionales en automatización domiciliaria. Este tipo de redes usando ZigBee se centran en el control esporádico en tiempo real de dispositivos, es decir, la red está normalmente en reposo; pero al introducir un cambio de estado en el sistema, se espera que el resultado de este se refleje a través de la red rápidamente. Un objetivo primordial es el de la interoperabilidad entre dispositivos sin importar su fabricante y que de esta manera se pueda añadir más dispositivos a una red ya establecida, o en caso de utilizar equipos de diferentes fabricantes, que se pueda añadir fácilmente a la red por dispositivos puente en caso de ser necesario. Mediante ZHA se puede controlar inalámbricamente interruptores, persianas, calefacción, entre otros dispositivos. Usando este mecanismo de automatización se puede controlar tantas instancias de una vivienda como los dispositivos lo permitan, teniendo así un control total, seguro, simple y de bajo costo . [Fierro, 2012]

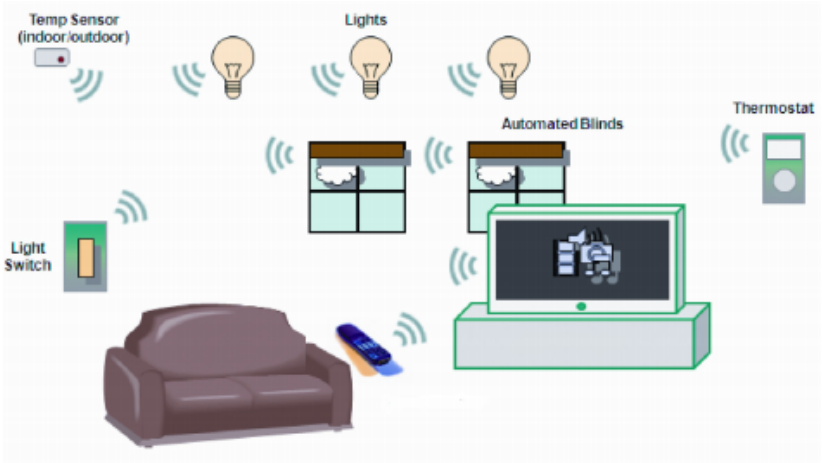


Figura 1.6: Esquema de un Sistema ZHA. Fuente: Organización ZigBee

1.2.5. Estándar IEEE 802.15.4-2006

Establece los lineamientos para una red de comunicaciones de bajo costo que permita conectividad inalámbrica en aplicaciones con energía limitada y rendimiento bajo. Se conoce a éstas redes como LR-WPAN (Low-rate wireless personal area network) y sus principales objetivos son la fácil instalación, transferencia de datos confiable, operación de corto alcance, muy bajo costo y una duración de batería razonable mientras se mantiene un protocolo simple y flexible. [Cedeño, 2010] Algunas de las principales características de una red LR-WPAN se presentan a continuación:

- Velocidades de transmisión de datos inalámbricos de 250kb/s, 100kb/s, 40kb/s y 20kb/s.
- Operación punto a punto estrella.
- Direcciones asignadas de 16 bits cortas o direcciones extendidos de 64 bits.
- Asignación opcional de intervalos de tiempo garantizados (GTS).
- Acceso al canal por detección de portadora de acceso múltiple con prevención de colisiones (CSMA-CA).
- Protocolo totalmente reconocido por su fiabilidad de transferencia.
- Bajo consumo de energía.
- Detección de energía (ED).
- Indicación de la calidad del enlace (ICT).
- 16 canales en la banda de 2450 MHz, 30 canales en la banda de 915 MHz y 3 canales en la banda de 868 MHz.

En una red IEEE 802.15.4 participan dos tipos de dispositivos, dispositivos de funciones completas o FFD (full function device) y dispositivos de funciones reducidas

o RFD (reduced function device). Un FFD puede funcionar en tres modos: como un coordinador de red de área personal (PAN), como coordinador o como dispositivo. Un FFD se puede comunicar con los RFD o con otros FFD, mientras que un RFD se puede comunicar solo con un FFD. Un RFD está destinado para aplicaciones que son extremadamente simples, como un interruptor de iluminación o como un sensor infrarrojo; no hay necesidad de enviar grandes cantidades de datos y se podrá asociar con un solo FFD a la vez por lo que se podrá implementar usando un mínimo de recursos y capacidad de memoria. [Cedeño, 2010]

No existe un área de cobertura bien definida para transmisión inalámbrica debido a que las características de propagación son dinámicas e inciertas, pequeños cambios en la posición o dirección pueden resultar en diferencias drásticas en la intensidad de la señal o en la calidad del enlace de comunicación.

1.2.5.1. Topologías de Red

Se tiene dos topologías en función a los requerimientos de la aplicación para una red LR-WPAN: topología de estrella o topología punto a punto. En la topología de estrella la comunicación se establece entre dispositivos y un único controlador central conocido como coordinador de la PAN. Todos los dispositivos que operen dentro de esta red deberán tener una dirección única de 64-bits, éstas se utilizarán para comunicación directa dentro de la red de área personal (PAN), o el coordinador de la PAN asignará una dirección corta cuando el dispositivo se asocie. Generalmente el coordinador de la PAN es alimentado directamente por la red eléctrica mientras que los otros dispositivos se alimentan mediante baterías. Dentro de las aplicaciones que usan la topología tipo estrella están: automatización domiciliaria, periféricos de computadora, juguetes, cuidado personal de salud. De igual manera la topología punto a punto tiene un coordinador de PAN, en esta topología cualquier dispositivo podrá comunicarse con cualquier otro dispositivo mientras este dentro del rango de cada uno. Ésta permite formar redes

mas complejas, tales como topologías de red de malla que benefician aplicaciones de controlo industrial y monitoreo, redes inalámbricas de sensores, rastreo de inventarios, agricultura y seguridad. Una red punto a punto puede ser ad hoc, auto organizada y auto correctiva y permitiría enrutar en varios saltos a mensajes entre cualquier dispositivo dentro de la red; lo cual deberá ser añadido en capas superiores y no es parte de este estándar. [Cedeño, 2010]

Cada PAN tiene un identificador único que permite la comunicación entre dispositivos dentro de una red usando direcciones cortas y permite la transmisión entre dispositivos a través de redes independientes.

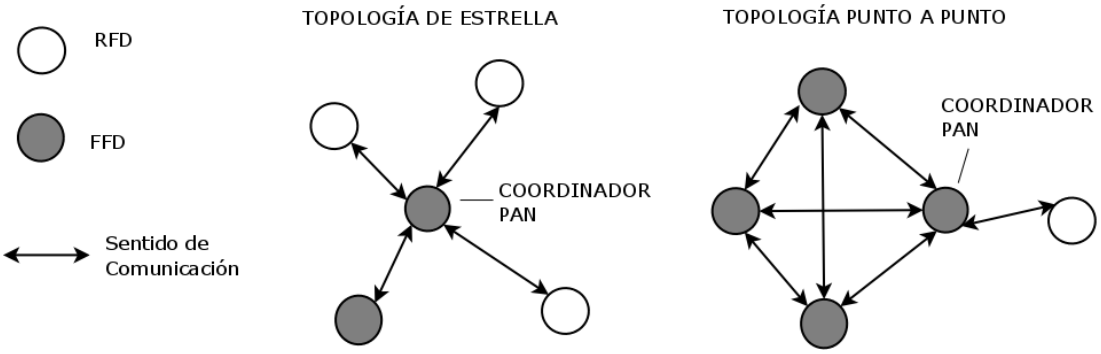


Figura 1.7: Ejemplos de topologías estrella y punto a punto. Fuente: Los Autores.

1.2.5.2. Topología de Malla

Es una sub-clase de la topología punto a punto en la que se forma un grupo de redes tipo árbol, agrupados entre las que se encuentren cercanas entre si. Una vez definidos los requerimientos de la red y la aplicación, el coordinador de la PAN deberá definir a un dispositivo como coordinador de la PAN del nuevo cluster adyacente al primero. Gradualmente, otros dispositivos se conectarán y repitiendo este proceso se formará una red de Malla o Multi-cluster. [Cedeño, 2010] Un ejemplo se puede observar en la siguiente figura:

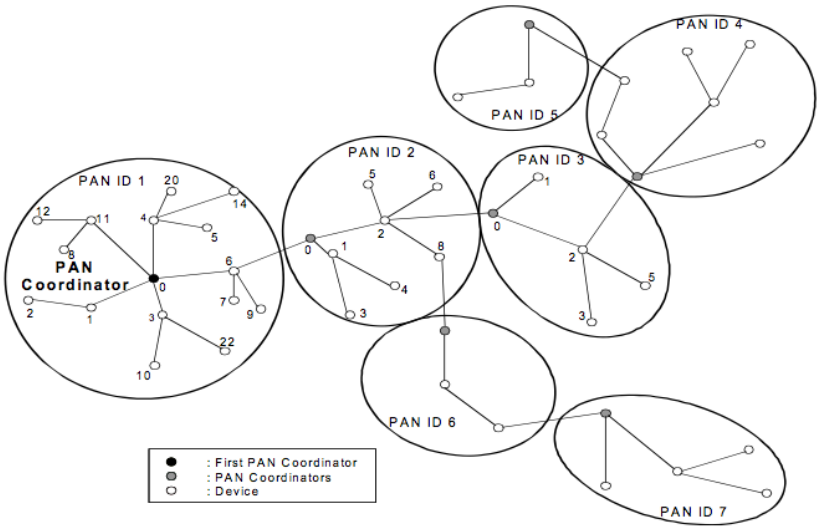


Figura 1.8: Ejemplo de topología tipo malla. Fuente: IEEE Std 802.15.4-2006

1.3. Módulos XBee

Teniendo en cuenta la practicidad que presenta el uso de el estándar ZigBee y el estándar IEEE 802.15.4-2006 la compañía Digi International Inc. lanzó al mercado un dispositivo de bajo costo que puede funcionar como coordinador, enrutador y dispositivo final en base a la programación y asignación que se le dé. Los módulos XBee desarrollados por Digi operan en la banda de frecuencias ISM 2.4GHz con muy bajo consumo y mantenimiento, lo que le hace un candidato perfecto para el desarrollo de aplicaciones de automatización en las que se quiere eficiencia, calidad y confiabilidad a muy bajo costo. Un punto importante acerca de la casa productora de este módulo es que provee amplia información correspondiente a las características tanto básicas como especificas, así como, todo lo referente a la programación y dirección de los módulos para que funcionen cumpliendo los estándares establecidos para el protocolo ZigBee. [Digi International Inc., 2014]

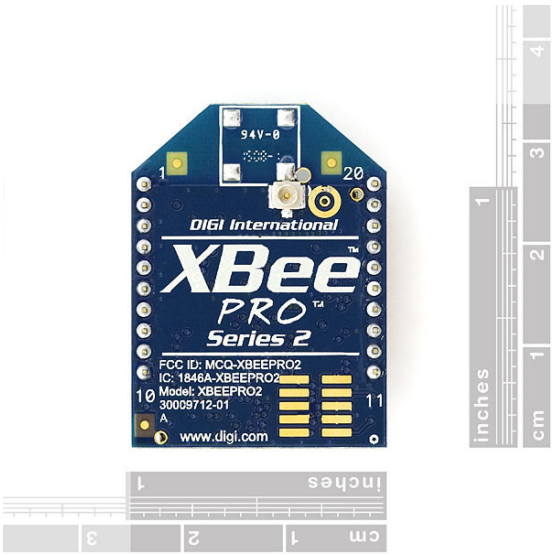


Figura 1.9: Digi International Inc. XBee Pro Series 2. Fuente: Digi International Inc.

Junto de la documentación proveída por Digi International Inc. se tiene el programa X-CTU, con el cual se realizará toda la programación de los módulos previo al establecimiento de la red ZigBee. Este permite realizar toda la configuración de radio, firmware de radio a usar, generador e interprete de tramas, prueba de rango de cada módulo, tipo de elemento dentro de la red para cada módulo tal como coordinador, enrutador o dispositivo final, establecimiento de PAN ID, entre otros.

1.3.1. Funcionamiento del Módulo XBee como Coordinador con el protocolo ZigBee

1.3.1.1. Formación de una Red

El coordinador selecciona el canal, PAN ID, política de seguridad y perfil de pila para una red, al ser el único dispositivo que puede iniciar una red es obligatorio que cada red ZigBee tenga un Coordinador. Una vez que se definieron los parámetros de la red el coordinador puede permitir que se unan a ésta nuevos dispositivos y de igual manera puede enrutar paquetes de datos y comunicarse con otros dispositivos dentro de la red. Para asegurar que el coordinador empiece una red en un canal adecuado y con un PAN

ID que no este en uso, el coordinador realiza una serie de búsquedas con el fin de descubrir cualquier actividad en el espectro de radiofrecuencia en diferentes canales y para encontrar cualquier red PAN cercana en operación. [Digi International Inc., 2014]

1.3.1.2. Selección del Canal

Al iniciar una red se debe escoger un canal apropiado para ésta, para lograr esto se realiza un escaneo de energía en diferentes canales de frecuencia para detectar los niveles de energía existente en cada canal. Los canales con niveles altos o excesivos de energía se descartan de una lista de posibles canales para ser asignados a la red en establecimiento.

1.3.1.3. Selección del PAN ID

Una vez completado el escaneo de energía, el coordinador revisa su lista de potenciales canales para obtener una lista de redes PAN aledañas. Para realizar esto el coordinador envía una señal de solicitud de señalización a cada canal potencial, todos los coordinadores y enrutadores responderán a la solicitud de señalización de regreso al coordinador con un señalizador. Dicho señalizador contiene la información de la PAN en la que se encuentra el dispositivo, incluyendo el PAN ID (16-bit y 64-bit); este proceso es conocido como un escaneo de PAN o un escaneo activo y una vez finalizado, el coordinador selecciona aleatoriamente un canal y un PAN ID para iniciar la red. [Digi International Inc., 2014]

1.3.1.4. Información Persistente

Una vez iniciada la red, el coordinador, conserva la siguiente información a través de un ciclo de alimentación o eventos de reinicio:

- PAN ID

- Canal de Operación
- Políticas de Seguridad
- Tabla de dispositivos enlazados al coordinador.

Esta información se almacena hasta que el coordinador abandone la red, cuando el coordinador abandona la red e inicia una nueva red dicha información se pierde.

1.3.2. Funcionamiento del Módulo XBee como Enrutador con el protocolo ZigBee

1.3.2.1. Búsqueda de Redes ZigBee

Para descubrir las redes ZigBee cercanas el enrutador realiza un escaneo de PAN de manera similar al realizado por un coordinador cuando inicia una red. Durante este escaneo, el enrutador envía una solicitud de señalización en el primer canal de su lista de canales de escaneo. Todos los coordinadores y enrutadores cercanos que trabajen en dicho canal responden a la señal de solicitud enviando una respuesta de señalización hacia el enrutador. Esta señal contiene información sobre la PAN cercana a la que pertenece el dispositivo, incluyendo el PAN ID y si es posible unirse a la red. [Digi International Inc., 2014] Se considera una PAN válida cuando:

- Tiene un PAN ID de 64-bits válido.
- Tiene el perfil de pila correcto.
- Permite que se unan nuevos dispositivos.

Si no se encuentra una PAN válida, el enrutador realiza el escaneo en el siguiente canal de su lista hasta que se encuentre un canal válido o hasta que se hayan escaneado todos los canales; si sucede esto último se realiza nuevamente el escaneo desde el

primer canal. La Alianza ZigBee establece que los dispositivos XBee realicen un 9 intentos de escaneo por minuto los primeros 5 minutos, y luego 3 escaneos por minuto. Típicamente se descubre una red en pocos segundos.[Digi International Inc., 2014]

1.3.2.2. Unirse a una Red

Una vez que se encuentra una red válida, se envía una solicitud de asociación hacia el dispositivo que envió una señal de señalización válida a la solicitud de unión a la red ZigBee. El dispositivo que permite la unión envía una trama de respuesta de asociación que acepta o niega dicha solicitud. Cuando un enrutador se une a una red, recibe una dirección de 16-bits del dispositivo que permitió la unión, esta dirección es seleccionada aleatoriamente.

1.3.2.3. Información Persistente

Una vez que un enrutador se une a una red, retiene la siguiente información en caso de reinicio o pérdida de energía:

- PAN ID.
- Canal de Operación.
- Políticas de seguridad y valores de contadores de tramas.
- Tabla de dispositivos enlazados al coordinador.

Al encender el dispositivo realizará inmediatamente una búsqueda si no se encuentra unido a una red.

1.3.2.4. Conectividad de Red del Enrutador

Una vez que un enrutador se une a una red, permanece conectado a ésta en el mismo canal y con la misma PAN ID mientras no sea forzado a abandonar la red. SI un enruta-

dor debe moverse físicamente fuera del rango de la red a la que se unió inicialmente, la aplicación deberá incluir previsiones para detectar si el enrutador puede comunicarse con su red original. Si no puede comunicarse con la red el enrutador deberá abandonar la red.

1.3.3. Funcionamiento del Módulo XBee como Dispositivo Final con el protocolo ZigBee

Similar a los enrutadores, los dispositivos finales deben encontrar y unirse a una red ZigBee válida. Luego de unirse a una red, un dispositivo final se puede comunicar con el resto de dispositivos de la red. Debido a que los dispositivos finales están destinados a funcionar con baterías poseen modos de funcionamiento de bajo consumo y modos de reposo para mejorar el uso de la energía. [Digi International Inc., 2014]

1.3.3.1. Búsqueda de Redes ZigBee

Se realiza el mismo proceso de búsqueda que realizan los enrutadores para buscar redes mediante el escaneo de PAN que se vio en la sección 1.3.2.1, con la diferencia de que el dispositivo final considera una PAN válida sí:

- Tiene un PAN ID de 64-bits válido.
- Tiene el perfil de pila correcto.
- Permite que se unan nuevos dispositivos.
- Tiene capacidad para dispositivos finales adicionales.

Si no se encuentra una PAN válida, se realiza el escaneo en el siguiente canal de su lista hasta que se encuentre un canal válido o hasta que se hayan escaneado todos

los canales; si sucede esto último, el dispositivo entra en un estado de reposo y ahorro de energía y realiza el escaneo luego. Si no se puede entrar en estado de reposo el dispositivo volverá a realizar el escaneo de manera similar a los enrutadores. [Digi International Inc., 2014]

1.3.3.2. Unirse a una Red

Una vez que el dispositivo encuentra una red válida, se envía una solicitud de asociación hacia el dispositivo que envió una señal de señalización válida a la solicitud de unión a la red ZigBee. El dispositivo que permite la unión envía una trama de respuesta de asociación que acepta o niega dicha solicitud. Cuando un dispositivo final se une a una red, recibe una dirección de 16-bits del dispositivo que permitió la unión, dicha dirección es seleccionada aleatoriamente. [Digi International Inc., 2014]

1.3.3.3. Relación Dispositivos Padres e Hijos

Debido a que un dispositivo final puede entrar en modos de ahorro de energía y no responder inmediatamente, por esta razón el dispositivo final depende de que el dispositivo que autorizó su unión a la red para que almacene temporalmente mensajes entrantes hacia este hasta que vuelva a estar activo y pueda recibir mensajes. Al dispositivo que permitió que se una a la red se lo conoce como Padre y el dispositivo que se une por este se lo conoce como Hijo. [Digi International Inc., 2014]

1.3.3.4. Capacidad de Dispositivos Finales

Los enrutadores y coordinadores mantienen una tabla de los dispositivos hijos que se han unido, conocida como la tabla de hijos. Esta tabla tiene un tamaño finito y determina cuantos dispositivos finales se pueden unir a la red. Si un enrutador o coordinador tiene al menos una entrada libre en su tabla de hijos se dice que tiene capacidad de dispositivos finales. Debido a que los enrutadores no se pueden suspender, no hay la

necesidad de que los enrutadores o coordinadores busquen a los enrutadores conectados a la red, por lo tanto, no existe un límite de enrutadores que se puedan unir tanto a otro enrutador como a un dispositivo coordinador. [Digi International Inc., 2014]

1.3.3.5. Información Persistente

Los dispositivos finales retienen el PAN ID, canal de operación, políticas de seguridad a lo largo de cualquier evento de reinicio o pérdida de alimentación. Sin embargo, estos dispositivos dependen en gran manera de sus dispositivos padres y realizan un escaneo de huérfano para tratar de encontrar a su dispositivo padre. Si el dispositivo no recibe una respuesta a este escaneo abandonará la red y tratará de encontrar una nueva red disponible, eliminando la información de PAN ID y canal operativo. [Digi International Inc., 2014]

Capítulo 2

DISEÑO

En esta sección se muestra los diagramas, esquemas y placas correspondientes para las tres partes principales del presente sistema de automatización: Red ZigBee, Actuador de Iluminación y del Servidor Web montado en Raspberry Pi. Se muestra a detalle todas las instancias requeridas para la construcción de la red de automatización.

2.1. Red ZigBee

Para el establecimiento de la red ZigBee se utilizan los módulos XBee Pro Series 2 de Digi International Inc. para el coordinador, enrutador y dispositivo final. Para esta aplicación en particular se utiliza el modo de operación API (Application Programming Interface ó Interfaz de Programación de Aplicación) el cual requiere que la comunicación con los módulos se haga a través de una interfaz estructurada en el cual la información se comunica mediante tramas en un orden definido. El modo API define como los mensajes de comandos, respuestas y estado del módulo se transmiten y reciben usando la trama de datos UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter ó Transmisor-Receptor Asíncrono Universal). A continuación se muestra, junto con los diseños de las tarjetas electrónicas, las tramas utilizadas en cada tipo de elemento de la red ZigBee, la forma de programarlas y las respuestas esperadas.

Para la configuración de los módulos ya sea como coordinador, enrutador o dispositivo final se hace uso de la herramienta de software X-CTU que provisto por Digi International Inc, provee una interfaz gráfica para la comunicación y configuración de los módulos XBee Pro Series 2, mediante un computador usando una conexión serial, para esto el programa provee el firmware disponible para cada módulo dependiendo si es Coordinador, Enrutador o Dispositivo Final, además envía comandos AT de configuración, a continuación se muestra el proceso:

- Conexión del módulo con la herramienta X-CTU

La conexión serial se realiza mediante USB, en primer lugar se añade el módulo en la herramienta como se muestra en la Figura 2.1, en donde se selecciona el puerto a conectarse y la velocidad del puerto que en este caso es de 115200 símbolos por segundo.

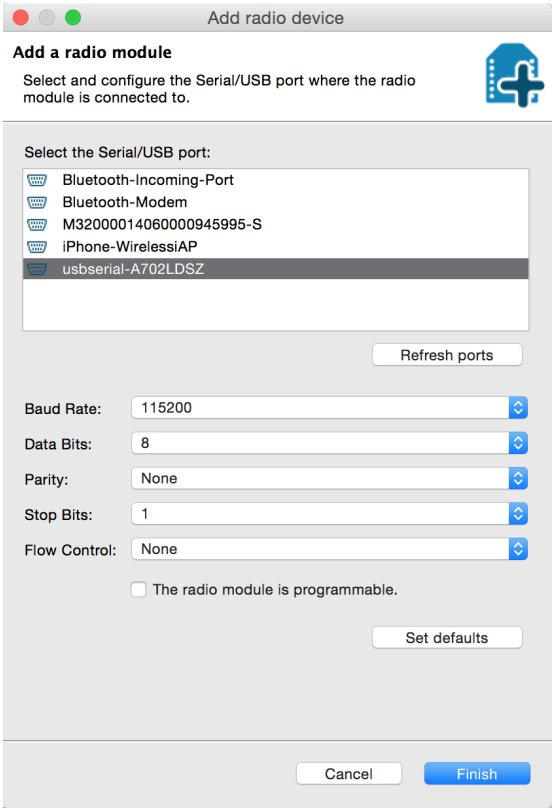


Figura 2.1: Conexión XBee a la interfaz X-CTU. Fuente: Los Autores

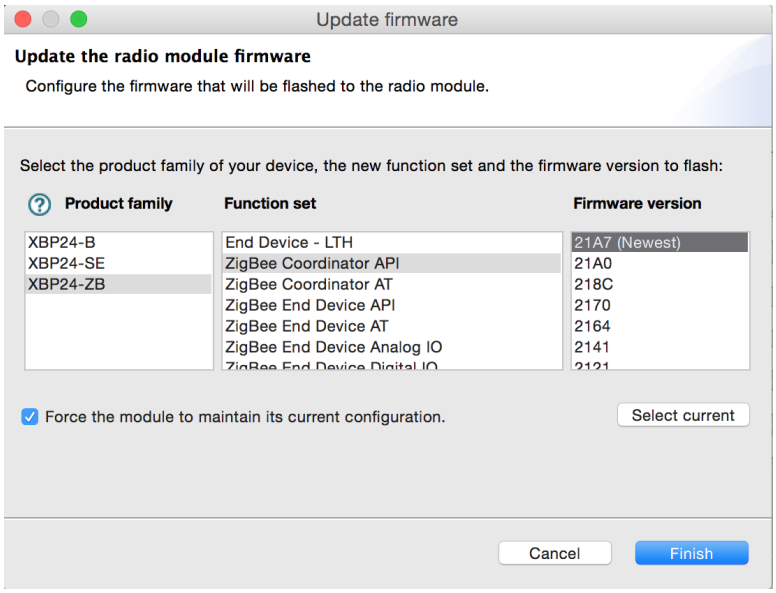


Figura 2.2: Instalación de firmware al módulo XBee. Fuente: Los Autores.

A continuación se procede a instalar el firmware ya sea sea como coordinador, enrutador o dispositivo final correspondiente al módulo Xbee especifico, Figura 2.2. Una vez instalado el firmware la herramienta permite la configuración de cada uno de los parámetros a usarse los cuales se detallan a continuación para cada tipo de módulo. El primer bloque corresponde a la configuración de red y está compuesto por los campos:

- PAN ID: Corresponde a la identificación de la red de área personal, este campo debe ser el mismo en todos los dispositivos que componen una misma red, una red diferente tendrá un diferente PAN ID y no se podrán conectar entre si.

    - Scan Channels: Especifica los canales a escanear cuando el coordinador está formando la red, de modo que pueda elegir el mas adecuado.
    - Scan Duration: Especifica la duración del escaneo de los canales.
    - Zigbee Stack Profile: Permite la configuración del tipo de Implementación Zigbee.
    - Node Join Time: Configura el tiempo en segundos que el dispositivo permitirá que otros puedan unirse a la red.

- Los parámetros siguientes son leídos del dispositivo y muestran información correspondiente a la red en la cual están funcionando.

Figura 2.3: Configuración de parámetros del bloque de red. Fuente: Los Autores.

En el siguiente bloque se presenta los parámetros de direccionamiento del dispositivo, los campos a utilizarse se detallan:

- SH y SL: Corresponden al numero de serie o dirección de 64 bits, dividido en dos partes de 32 bits.

  - También se pueden especificar la dirección de 64 bits de destino, estos campos al igual que los siguientes se configuran con los valores por defecto, para asegurar así la conexión del máximo numero de dispositivos que pueden unirse al coordinador.

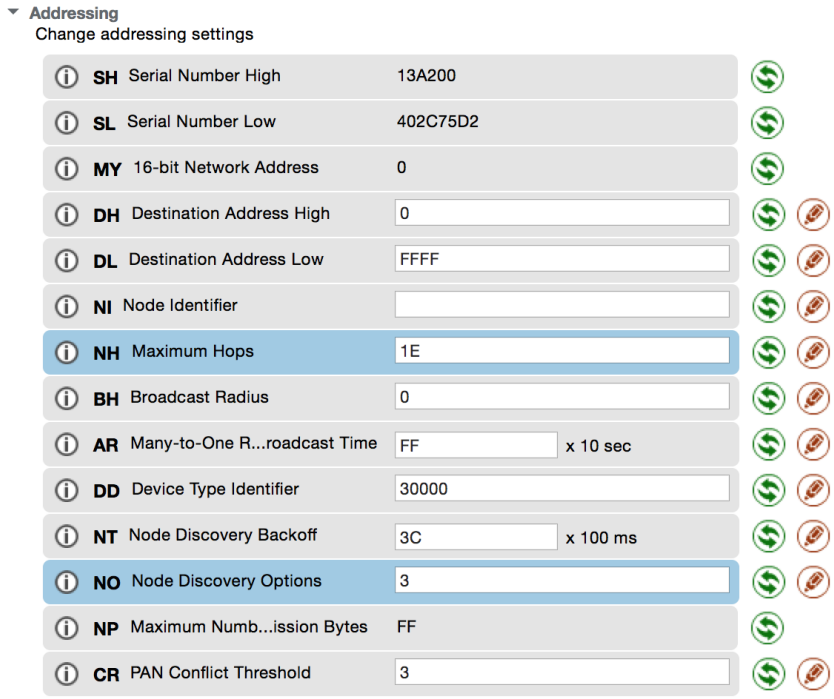


Figura 2.4: Configuración de parámetros del bloque de direccionamiento. Fuente: Los Autores.

El tercer bloque de configuración permite la configuración de la interface RF. El único campo configurable en esta parte es el Power Mode, en el cual se puede activar o desactivar el modo Boost, el cual cuando se encuentra activado mejora la sensitividad del dispositivo en 1dB y aumenta la potencia de salida en 2dB mejorando el margen de enlace y el rango. El bloque de Seguridad permite activar o desactivar la opción de encriptar los datos a transmitir, para esto en los campos de configuración es posible especificar una llave de encriptación. El bloque siguiente configura la interface serial.

- El primer parámetro importante a configurar es la Tasa de Baudios, ésta debe ser la misma en todos los dispositivos que componen la red.

    - Además en esta sección se debe habilitar el modo API (Application Programming Interface ó Interfaz de Programación de Aplicación)

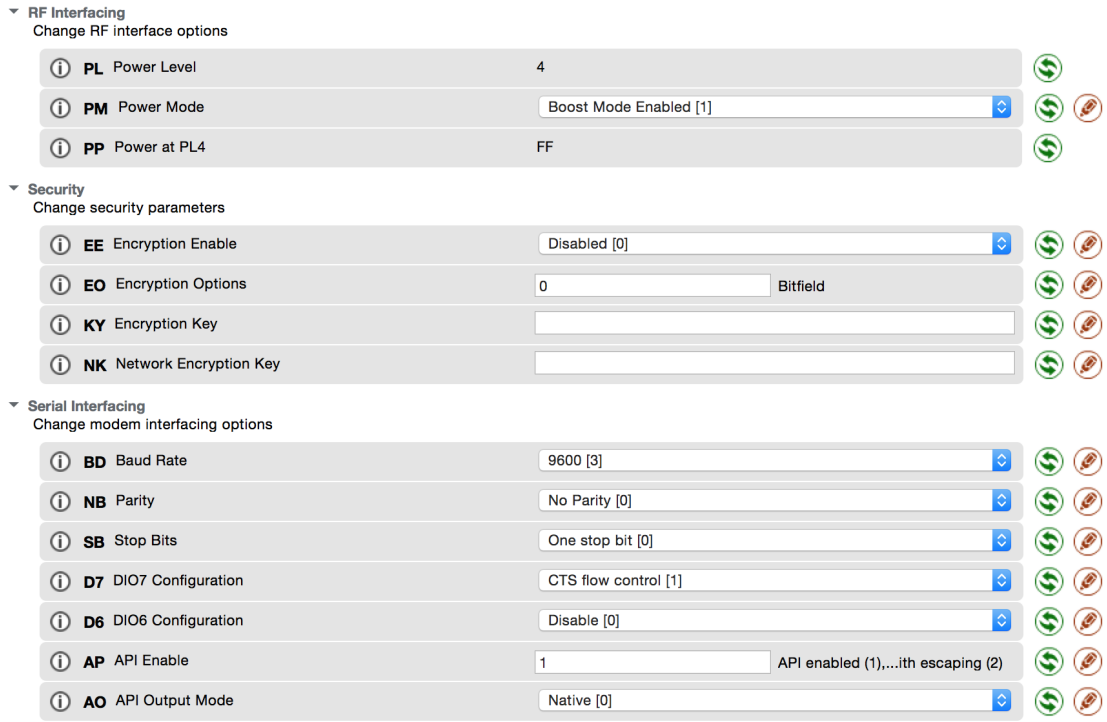


Figura 2.5: Configuración de parámetros del bloque RF, de seguridad y de Interfaz Serial. Fuente: Los Autores.

El bloque Sleep Mode permite la configuración del tiempo que el coordinador retendrá una trama que se envía a un Dispositivo final que se encuentra en modo sleep, este valor debe ser configurado de tal manera que sea mayor al tiempo que el dispositivo final permanece dormido, ya que si el tiempo es menor la trama se descarta y el dispositivo final es borrado de la tabla de dispositivos en la red del coordinador.

El bloque siguiente permite la configuración de las entradas y salidas ya sean digitales o analógicas que maneja el dispositivo cada pin presenta cuatro opciones, ADC (Conversor analógico digital), Entrada Digital, y Salida Digital ya sea en estado bajo o alto. Si se tienen entradas analógicas configuradas en este bloque se configuran los parámetros de muestreo, aquí se especifica cada que tiempo se deben tomar las muestras de las entradas analógicas, además permite la habilitación de dos opciones mas, una de ellas el cambio de estado de cualquier entrada digital, es decir cuando una entrada cambia de estado, una muestra es enviada hacia el coordinador, y la segunda opción permite el envío de una muestra cuando el nivel de batería es menor al especificado en

la configuración. El último bloque muestra información correspondiente al dispositivo, la versión de firmware, de hardware, el estado de la batería.

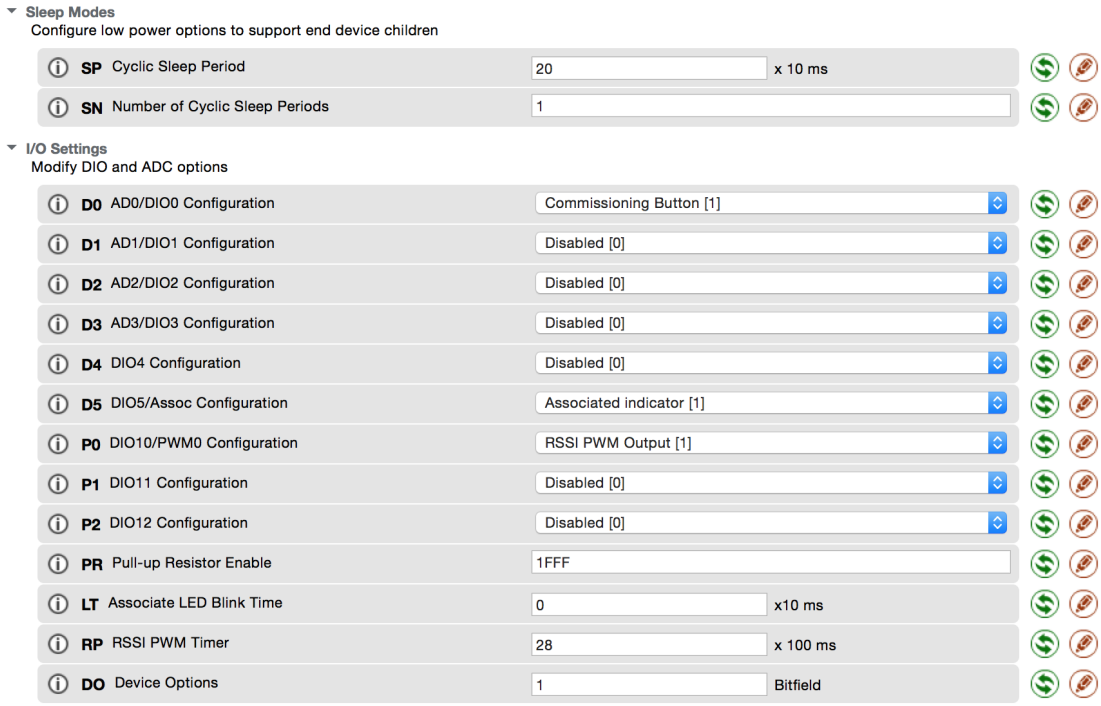


Figura 2.6: Configuración de parámetros del bloque Sleep Mode y el bloque de Entradas y Salidas. Fuente: Los Autores.

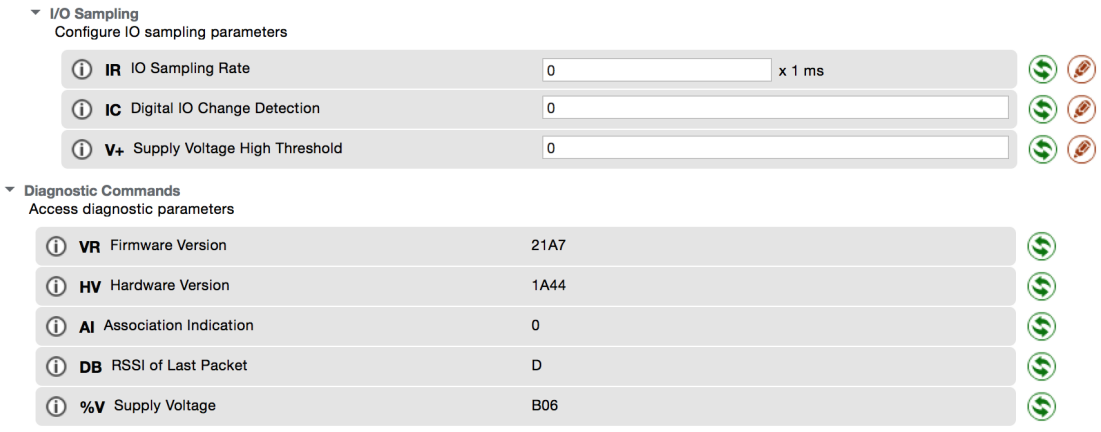


Figura 2.7: Configuración de parámetros del bloque de Muestreo y de Información del Dispositivo. Fuente: Los Autores.

2.1.1. Coordinador

La primera sección de la red ZigBee corresponde al coordinador. Este se encuentra conectado a la unidad Raspberry Pi, donde se encuentra alojado el servidor web. Pri-

meramente se necesita configurar el dispositivo como coordinador de la red ZigBee, de manera que los dispositivos que componen la red puedan comunicarse con este, para este fin se utiliza la herramienta de software X-CTU que provisto por Digi International Inc.

2.1.1.1. Configuración para la red ZigBee mediante X-CTU

A continuación se presenta la configuración del coordinador.

- Luego de establecer la conexión entre el módulo y el computador, se procede a cargar el firmware correspondiente al coordinador:
  - Modelo: XBP24-ZB
  - Función: Zigbee Coordinator API
  - Firmware versión: 21A7 (La ultima versión verificada por el software X-CTU)
- Se configuran los parámetros:
  - PAN ID: Se selecciona el ID de la red de área personal la cual puede estar en un rango entre 0x1 y 0xFFFFFFFFFFFFFFFF, o el valor por defecto que es 0x0 en donde se asigna un PAN ID aleatorio, en este caso es conveniente asignar un valor fijo para futuras referencias, por lo que se asigna el valor de 0xA, aclarando que si se forma una red diferente deberá tener un diferente PAN ID.
  - Además se configura el campo Cyclic Sleep Period de la sección Sleep Modes, con el valor de 0x64, esto significa que el coordinador almacenara en buffer la trama a enviar por el período de un segundo si el dispositivo final está dormido, este valor debe ser el mismo tanto en el enrutador como en el dispositivo final, la configuración de este último se explica mas adelante.

- El tasa de baudios para la transmisión es de 115200 la cual debe ser la misma en todos los dispositivos.
- En los demás campos se usan los valores por defecto, aprovechando así al máximo el numero de conexiones que puede aceptar el coordinador.

2.1.1.2. Esquema Eléctrico

Para la alimentación eléctrica del coordinador ZigBee de la red se utilizan la interconexión a los puertos GPIO de Raspberry Pi, al ser el coordinador el elemento del cual depende el funcionamiento de la red y al estar alimentado por el módulo Raspberry Pi se ha alimentado a este último mediante la red eléctrica existente en sitio de instalación para asegurar que no se pierda la red en ningún momento.

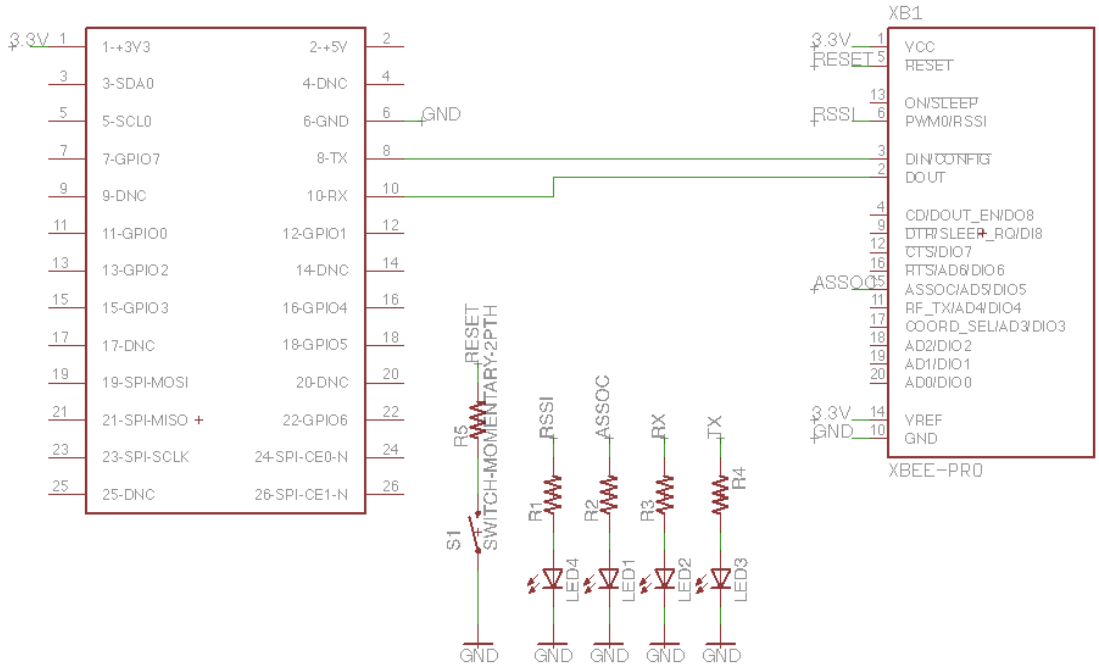


Figura 2.8: Esquema Eléctrico de Conexión del Coordinador XBee al Raspberry Pi. Fuente: Los Autores.

El esquema de la Figura 2.8 muestra las conexiones realizadas entre el Raspberry Pi y el módulo XBee, en donde el transmisor y receptor del puerto serial del Raspberry Pi están conectados al receptor y transmisor respectivamente del módulo XBee, además la alimentación de 3.3V requerida por el módulo es tomada del pin1 del Raspberry

Pi que convenientemente ofrece este voltaje, por último se añaden LED's indicadores tanto para la transmisión y recepción de datos así como para los indicadores de estado y recepción del módulo.

Lista de Elementos

- 1 x Raspberry Pi B.
- 1 x XBee Pro Series 2.
- 4 x LED 3mm.
- 5 x Resistencia 330Ω 1/4W.
- 1 x Pulsante 5mm.

2.1.1.3. Circuito Impreso

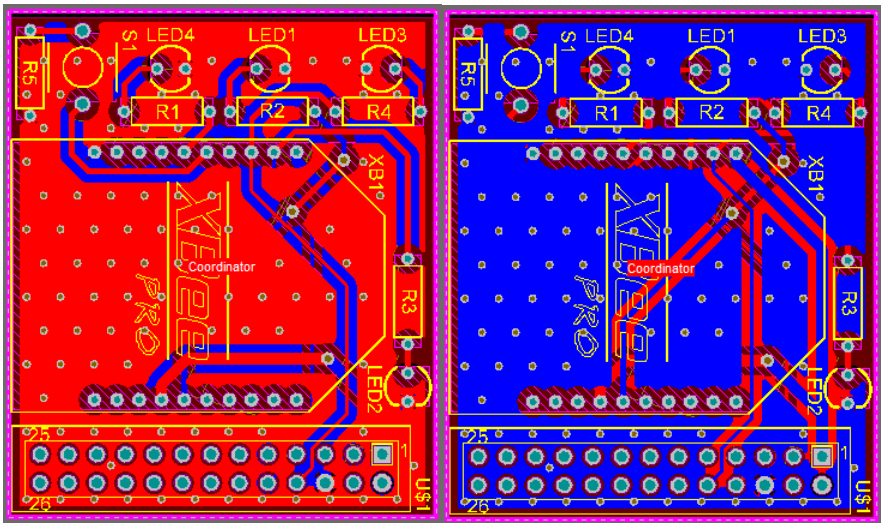


Figura 2.9: Izquierda: Cara superior del circuito impreso para el coordinador. Derecha: Cara inferior del circuito impreso para el coordinador. Fuente: Los Autores.

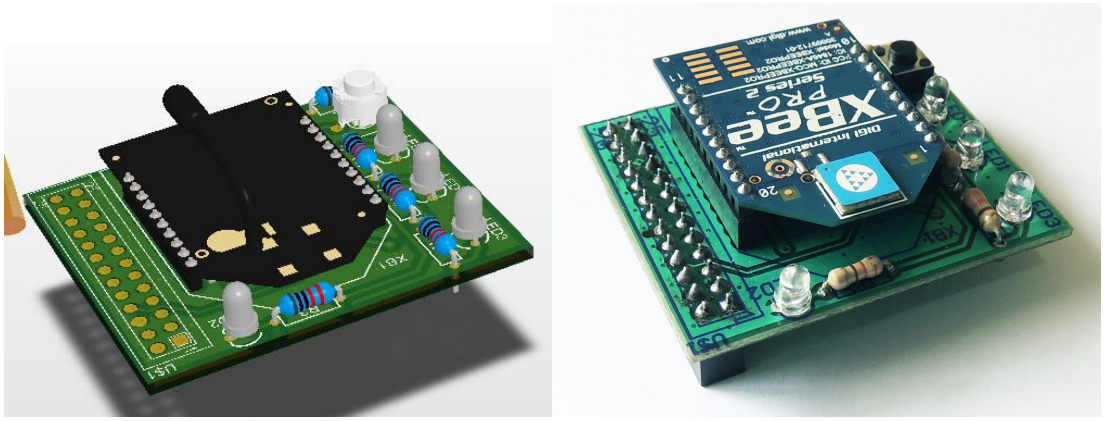


Figura 2.10: Izquierda: Representación 3D del circuito impreso para el coordinador de la red. Derecha: Imagen del circuito impreso real terminado. Fuente: Los Autores.

Esta placa de circuito impreso se conecta directamente a los puertos GPIO del Raspberry Pi para completar el grupo del coordinador y la conexión de la base de datos con la red ZigBee.

2.1.2. Enrutador

2.1.2.1. Configuración para la red ZigBee mediante X-CTU

A continuación se presenta la configuración del enrutador:

El enrutador al ejecutar una función similar a la del coordinador presenta la misma configuración, con la diferencia del firmware a cargarse en el módulo.

- Se carga el firmware correspondiente al enrutador:
  - Modelo: XBP24-ZB.
  - Función: Zigbee Router API.
  - Firmware versión: 23A7 (La ultima versión verificada por el software X-CTU).
- A continuación los bloques de configuración:

- PAN ID: Se configura con el valor 0xA de modo que este dentro de la misma red de área personal que el coordinador.
- Se configura el parámetro Cyclic Sleep Period con el valor 0x3E8 de modo que sea el mismo del coordinar y del dispositivo final.

2.1.2.2. Esquema Eléctrico

Una vez completado todo el equipo necesario para el coordinador se procedió al diseño del módulo enrutador, al ser un dispositivo que necesita estar alimentado todo el tiempo se ha considerado para su diseño una fuente exterior la cual se conectará mediante un terminal USB macho, compatible con la mayoría de fuentes de carga modernas para dispositivos móviles.

El esquema diseñado es simple, ya que el enrutador solamente necesita estar alimentado para cumplir su función, ya que trabaja a manera de puente entre el coordinador y el dispositivo final, por lo que está constituido solamente de un regulador de voltaje de 3.3V para alimentar el módulo y de LED's indicadores de transmisión y recepción de datos, así como del estado del dispositivo.

Se opto por alimentación externa por medio de USB, ya que diseñar una fuente de alimentación integrada implica un mayor tamaño del dispositivo, además de un costo mayor de producción, cuando en el mercado existen fuentes del mismo tipo de tamaño mas pequeño y costos inferiores.

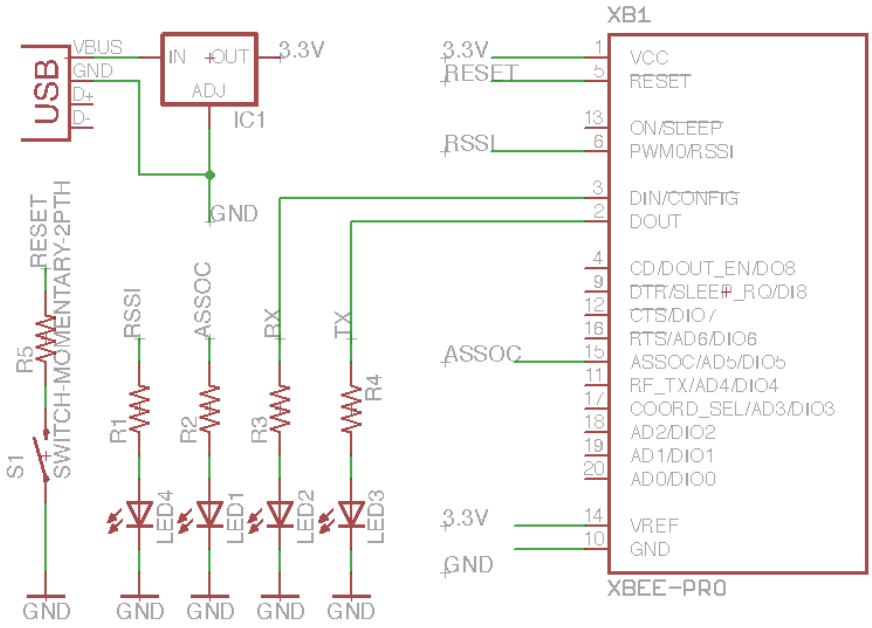


Figura 2.11: Esquema Eléctrico del Enrutador XBee. Fuente: Los Autores.

Lista de Elementos

- 1 x XBee Pro Series 2.
- 1 x Conector USB macho tipo A.
- 1 x LM1117.
- 4 x LED 3mm.
- 5 x Resistencia 330Ω 1/4W.
- 1 x Pulsante 5mm.

2.1.2.3. Circuito Impreso

Se procedió a realizar las placas impresas finales en base a los diseños del esquema eléctrico presentado anteriormente en la Figura 2.11, para el mismo se tomó muy en cuenta la reglas de diseño tales como: ancho de pista correcto, disposición de elementos, planos de tierra, entre otros, para asegurar un correcto funcionamiento en cualquier tipo de situación.

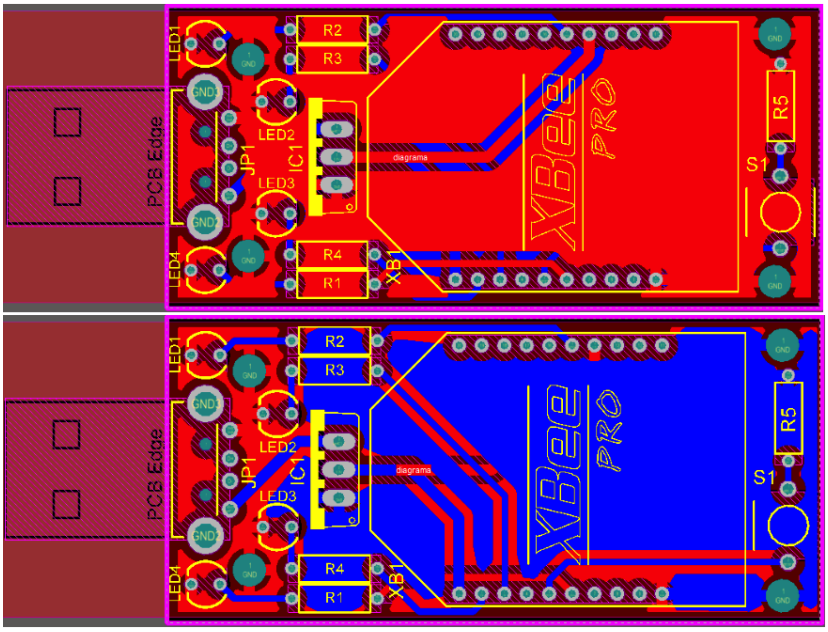


Figura 2.12: Arriba: Cara superior del circuito impreso para el enrutador. Abajo: Cara inferior del circuito impreso para el enrutador. Fuente: Los Autores.

Figura 2.13: Arriba: Representación 3D del circuito impreso para el enrutador. Abajo: Circuito Impreso del enrutador terminado. Fuente: Los Autores.

2.1.3. Dispositivo Final

Para el dispositivo final se utiliza una batería de ion de litio con una capacidad de 2000mAh a 3,7V tanto para la alimentación del módulo XBee como para los relés de estado solido, parte del actuador de iluminación. Esto permite que pueda ser instalado en el espacio asignado para un interruptor de iluminación estándar. Debido al limitado espacio existente se optó por utilizar un circuito dedicado de carga incluido en los paquetes de baterías de ion de litio, este previene que cualquier sobrecorriente afecte al circuito impreso y asegura una óptima carga de la batería.

2.1.3.1. Configuración para la red ZigBee mediante X-CTU

Se configuraron los siguientes parámetros en el dispositivo final:

- Se carga el firmware correspondiente al enrutador:
  - Modelo: XBP24-ZB.
  - Función: Zigbee End Device API.
  - Firmware versión: 29A7 (La ultima versión verificada por el software X-CTU).
- A continuación los parámetros a configurar:
  - PAN ID: se configura el valor 0xA correspondiente al ID de la red de área personal.
  - Cyclic Sleep Period: Se asigna el valor de 0x64, este valor se escogió de manera que el dispositivo se duerma por períodos de un segundo, así cuando se envíe una trama desde el coordinador, si el dispositivo final está dormido le tomara de cero a un segundo en recibir la trama, además la ventaja de que el dispositivo duerma por períodos es aumentar el ciclo de descarga de la batería.

- Se configuran los siguientes puertos de entrada y salida a ser utilizados en el actuador de iluminación.
    - D1: Configurado como entrada digital, este lleva información acerca del estado del conmutador físico en el dispositivo final
    - D2: Configurado como salida digital, este maneja el relé de estado solido normalmente cerrado.
    - D3: Configurado como salida digital, este prende un LED que indica un bajo voltaje en el dispositivo, es decir se necesita recargar la batería.
    - D4: Configurado como salida digital, este maneja el relé de estado solido normalmente abierto.
- Se configura la sección de muestreo del dispositivo
    - IC: Este parámetro permite la detección de un cambio en una entrada digital, en este caso la entrada digital es la D1, por lo que se configura con el valor de 2, que transformado a binario seria 00000000010 la mascara de bit que especifica que entrada a monitorear.
    - V+: Este parámetro es configurado con el valor 0xD46, esto significa que cuando el voltaje en el dispositivo sea igual o menor a 2.9V, el dispositivo enviara junto con las tramas de muestreo el valor del voltaje actual.

2.1.3.2. Esquema Eléctrico

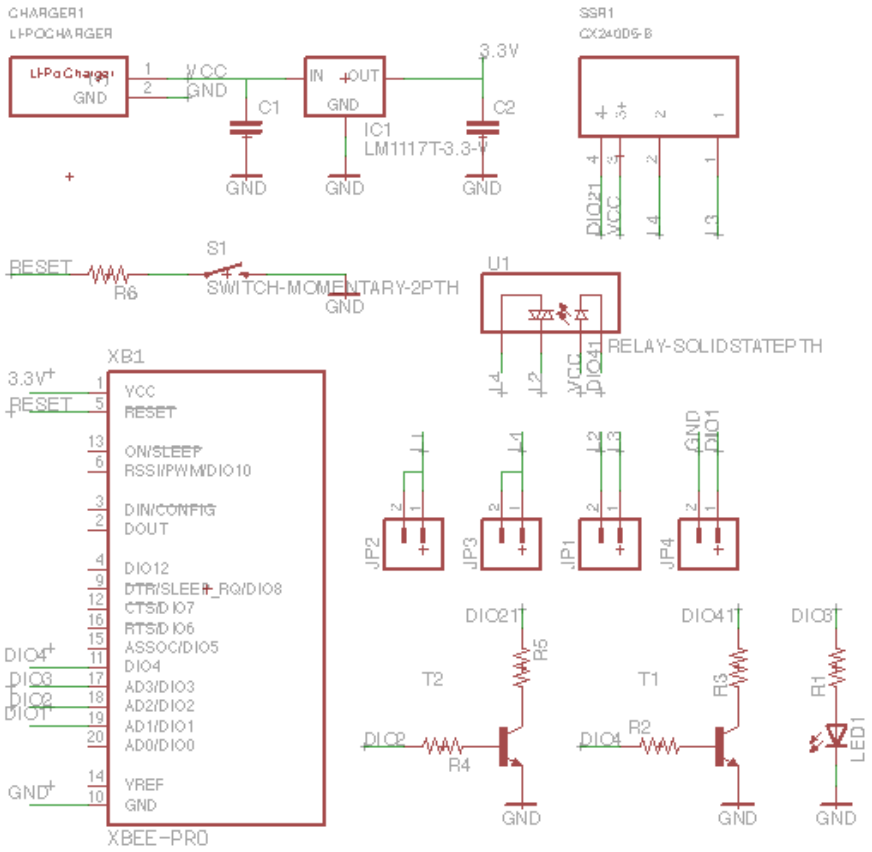


Figura 2.14: Esquema Eléctrico del Dispositivo Final XBee. Fuente: Los Autores.

Lista de Elementos

- 1 x XBee Pro Series 2.
- 4 x Conector 2 pines.
- 1 x LM1117.
- 1 x Relé estado sólido Crydom CX240D5-B NC.
- 1 x Relé estado sólido Sharp S108T02 NO.
- 2 x Transistor 2N2222.
- 4 x LED 3mm.

- 6 x Resistencia 330Ω 1/4W.
- 1 x Pulsante 5mm.

2.1.3.3. Circuito Impreso

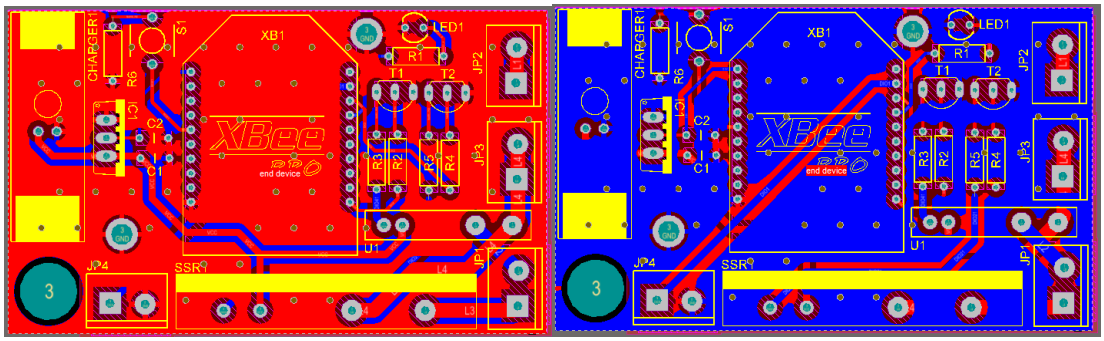


Figura 2.15: Izquierda: Cara superior del circuito impreso para el dispositivo final. Abajo: Cara inferior del circuito impreso para el dispositivo final. Fuente: Los Autores.

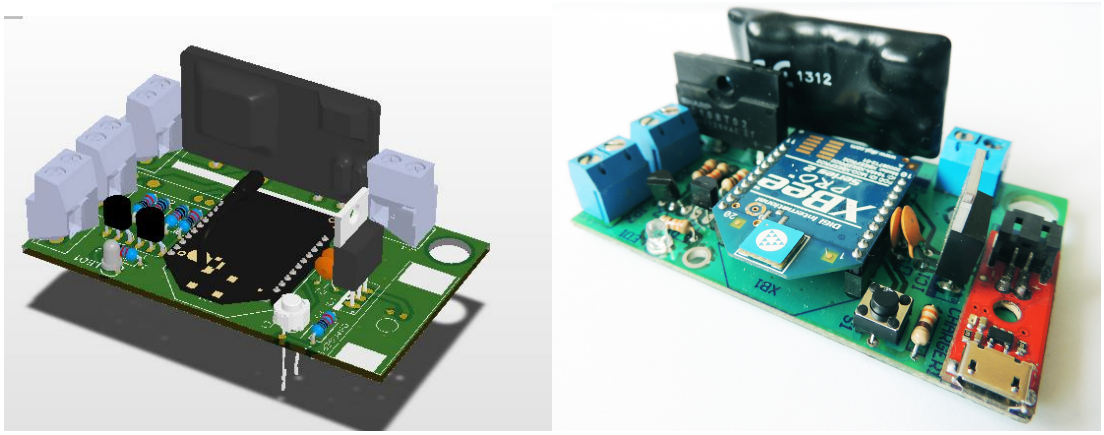


Figura 2.16: Izquierda: Representación 3D del circuito impreso para el dispositivo final. Derecha: Circuito Impreso terminado del dispositivo final. Fuente: Los Autores.

2.2. Actuador de Iluminación

En el diseño del actuador de iluminación se tuvo en consideración los siguientes aspectos como puntos de partida:

- Funcionamiento continuo incluso si se pierde la carga de la batería.

- Compatible con las instalaciones eléctricas existentes.
- Tamaño reducido.
- Funcionamiento con independencia de la red eléctrica por batería.

Una vez que se tuvo en cuenta los puntos anteriores se procedió a partir del previo diseño del dispositivo final de la red ZigBee, a continuación se muestran las diferentes etapas del diseño del actuador de iluminación a implementar en dicha red.

2.2.1. Esquema Multifilar

Antes de diseñar el actuador de iluminación se procedió a diseñar el esquema eléctrico del mismo, en la figura se muestra el esquema multifilar, el cual consta de un conmutador y dos relés de estado solido los cuales son manejados por los puertos de salida del módulo XBee Pro Series 2.

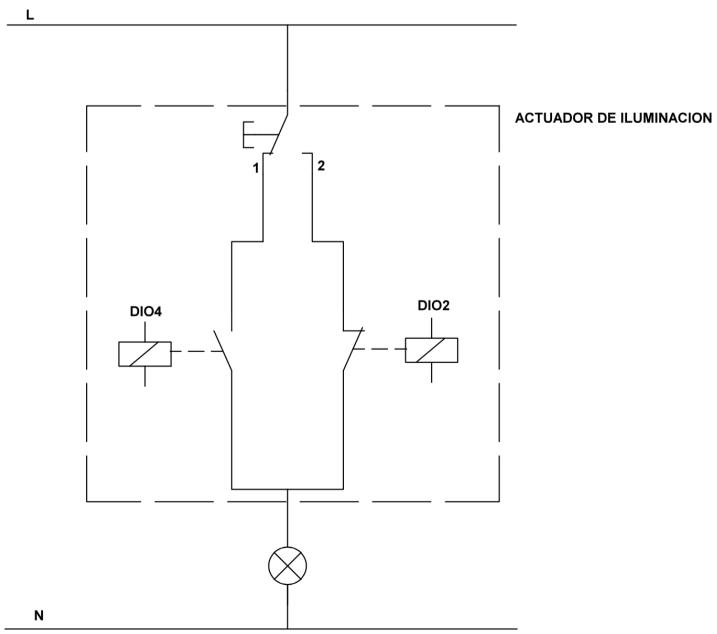


Figura 2.17: Esquema Eléctrico Multifilar del Actuador de Iluminación. Fuente: Los Autores.

Para el actuador de iluminación si se controla de manera remota se cumplirá la siguiente tabla de verdad dependiendo de la posición del encendido manual:

Entradas				Salidas		
Encendido Remoto		Encendido manual		DIO2	DIO4	LUMINARIA
1= on	0 = off	Pos 1=1	Pos 2=0			
0		0		1	X	0
0		1		X	0	0
1		0		0	X	1
1		1		X	1	1

Cuadro 2.1: Tabla de Verdad para el Actuador de Iluminación. Fuente: Los Autores.

A modo de dos conmutadores el sistema está diseñado de manera que si se enciende la luminaria de manera remota se pueda apagar de manera manual y viceversa, independientemente de la posición del conmutador físico.

En el Tabla 2.2 se muestra la tabla de verdad cuando se da una transición de control remoto a control manual ya sea de encendido a apagado y viceversa.

Conmutador		Remoto		Manual		DIO2	DIO4	LUMINARIA
Pos 1=1	Pos 2=0	1=on	2=off	1=on	2=off			
0		0		0		-	-	-
0		0		1		0	X	1
0		1		0		1	X	0
0		1		1		-	-	-
1		0		0		-	-	-
1		0		1		X	1	1
1		1		0		X	0	0
1		1		1		-	-	-

Cuadro 2.2: Tabla de Verdad para el Actuador de Iluminación en caso de Transición de Control Remoto a Manual. Fuente: Los Autores.

En el siguiente Tabla 2.3 se muestra la tabla de verdad cuando se da una transición de control manual a control remoto ya sea de encendido a apagado y viceversa.

Además como se puede ver en el esquema al tener un relé normalmente cerrado en el caso que se pierda la carga de la batería, la luminaria puede ser controlada por el conmutador manual independientemente, cumpliendo así uno de los objetivos del diseño.

Con estas condiciones, se diseño el software que maneja las tramas enviadas desde el coordinador hacia el dispositivo final, el mismo que será especificado en la sección de

Conmutador		Manual		Remoto		DIO2	DIO4	LUMINARIA
Pos 1=1	Pos 2=0	1=on	2=off	1=on	2=off			
0		0		0		-	-	-
0		0		1		0	X	1
0		1		0		1	X	0
0		1		1		-	-	-
1		0		0		-	-	-
1		0		1		X	1	1
1		1		0		X	0	0
1		1		1		-	-	-

Cuadro 2.3: Tabla de Verdad para el Actuador de Iluminación en caso de Transición de Control Manual a Remoto. Fuente: Los Autores.

la conexión con la red ZigBee.

2.3. Servidor Web montado en Raspberry Pi

Se optó por un Raspberry Pi, ya que está diseñado para trabajar con el sistema operativo linux, específicamente la distribución Raspbian, la cual es una adaptación de Debian pero que aprovecha al máximo los recursos del dispositivo, dicho esto se uso el siguiente software:

- Servidor Web con soporte PHP: Apache versión 2.4
- Base de Datos: MySQL Database.

Cabe recalcar que el software utilizado es Open Source y no requiere ninguna licencia propietaria, una de las grandes ventajas que se tiene es la abundante información y soporte que se puede encontrar de manera gratuita para el desarrollo de aplicaciones tales como la presente en este documento.

Uno de los objetivos del uso de una interfaz web para el control del actuador de iluminación, es que este sea multiplataforma, es decir que se pueda acceder desde cualquier tipo de dispositivo independientemente de su sistema operativo, y con esta implementación lo único que se requiere para el acceso es un explorador web.

Otro objetivo del uso del servidor Web montado en Raspberry Pi es brindar la mayor seguridad posible para el acceso y control del sistema de automatización, si bien uno de los puntos principales es que se pueda acceder desde cualquier dispositivo conectada a internet, se prima la importancia y la integridad tanto de la base de datos como de la pagina web de la cual se controla el antes mencionado sistema. El sistema se encontrará activo siempre y cuando el servidor físico implementado esté alimentado mediante la red eléctrica, como se indicó anteriormente en caso de falla los actuadores podrán funcionar normalmente como un interruptor común. El servidor web consta de 3 partes principales: Pagina Web, Base de Datos y Conexión con la Red ZigBee.

2.3.1. Página Web

La pagina web diseñada consta de tres partes, página de inicio, página de programador/Instalador y página de usuario. En ambos casos se consideró que al ser una aplicación web se podría acceder desde diferentes dispositivos tales como: Smartphones, Tablets y Computadora; cada uno de estos consta con diferentes tamaños de pantalla y resolución por lo que se optó por utilizar las herramientas proveídas por el marco de diseño web gratuito Bootstrap, el cual permite diseñar paginas intuitivas que se ajusten a lasa necesidades del usuario.

La pagina web está montada en el servidor web Apache 2.4, y está programada en HTML, PHP y JAVASCRIPT.

2.3.1.1. Página de Inicio

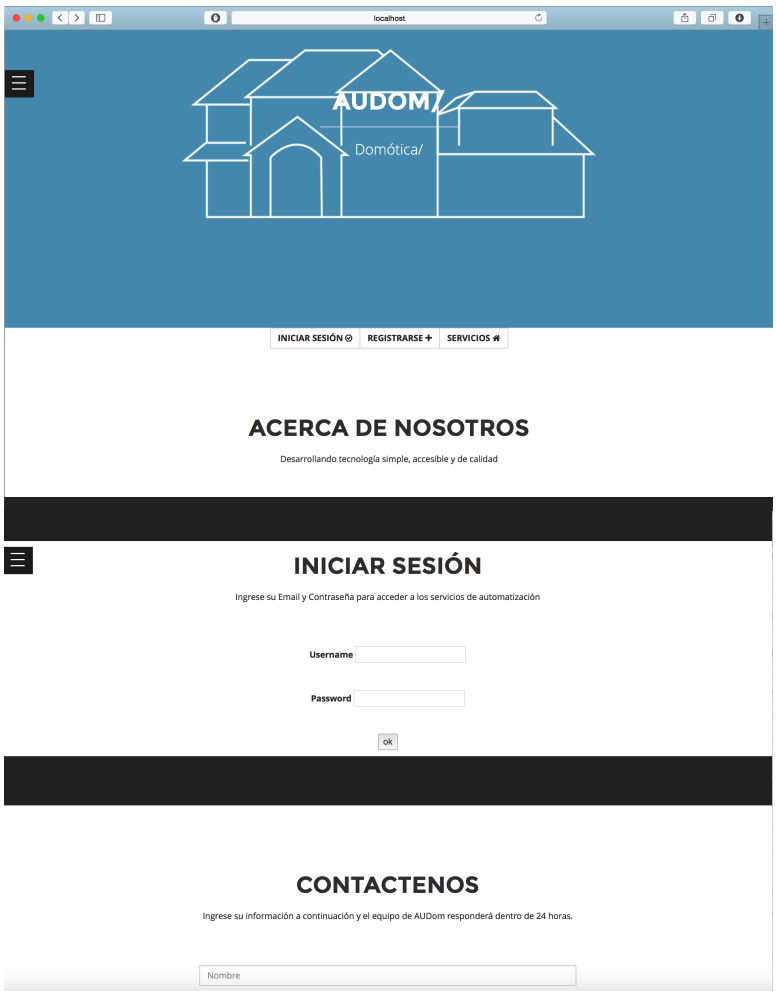


Figura 2.18: Página de Inicio. Fuente: Los Autores.

En la página de inicio se muestra información general sobre el sistema de automatización como es: tecnología usada, beneficios, forma de contacto e inicio de sesión de usuario. Se presenta una vista muy general de los servicios de automatización proveídos mediante el uso de recursos Open Source, junto con las principales ventajas del uso del mismo. A continuación se presenta la página de inicio en la Figura 2.18.

La sección de inicio de sesión fue creada para la seguridad del usuario de modo que un usuario no autorizado, es decir que no tenga los datos de autenticación, no podrá controlar las luminarias de manera remota, así si y solo si la autenticación es correcta se dará paso a la pagina de usuario.

2.3.1.2. Página de Usuario

En la página de usuario se muestra información puntual sobre el control de luminarias sin entrar en mucho detalle, de igual manera se consideró que el tipo de usuario puede ser desde un niño hasta un adulto mayor por lo que se diseñó la interfaz de usuario para que sea fácilmente operada con iconos grandes y claros que indican la forma de encendido y apagado de las luminarias.

Como se ve en la Figura 2.19 los dispositivos están separados por secciones o pisos, los cuales a su vez contienen los dispositivos finales, todos estos son cargados según la base de datos utilizando un script PHP, por lo que para incluir un nuevo dispositivo no es necesario modificar el código de la pagina web, esto se explica en la pagina de administración.

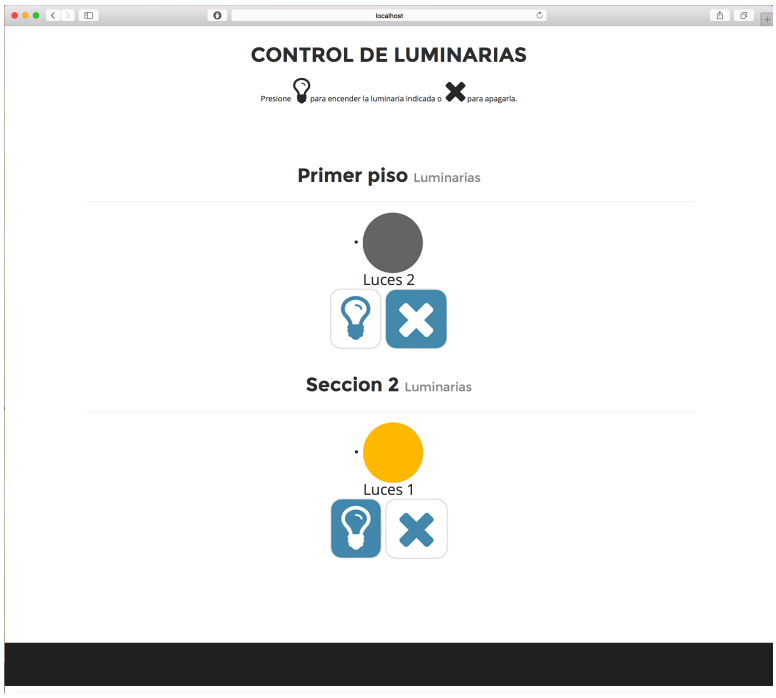


Figura 2.19: Página de Usuario. Fuente: Los Autores.

2.3.1.3. Página de Administración

Considerando que para cada caso de aplicación, el sitio de instalación será diferente con diferentes necesidades por lo que se vio útil incluir una pagina la cual incluya toda

la información a detalle sobre el sitio de instalación.

Por medio de esta pagina se puede agregar o eliminar secciones o pisos, que a su ves contienen uno o varios actuadores, de esta manera son agregados o eliminados de la base de datos de una manera rápida y practica.

Esta pagina consta de dos secciones, una para agregar o eliminar dispositivos y otra para secciones o pisos, de igual manera se utilizan scripts PHP para modificar la base de datos.

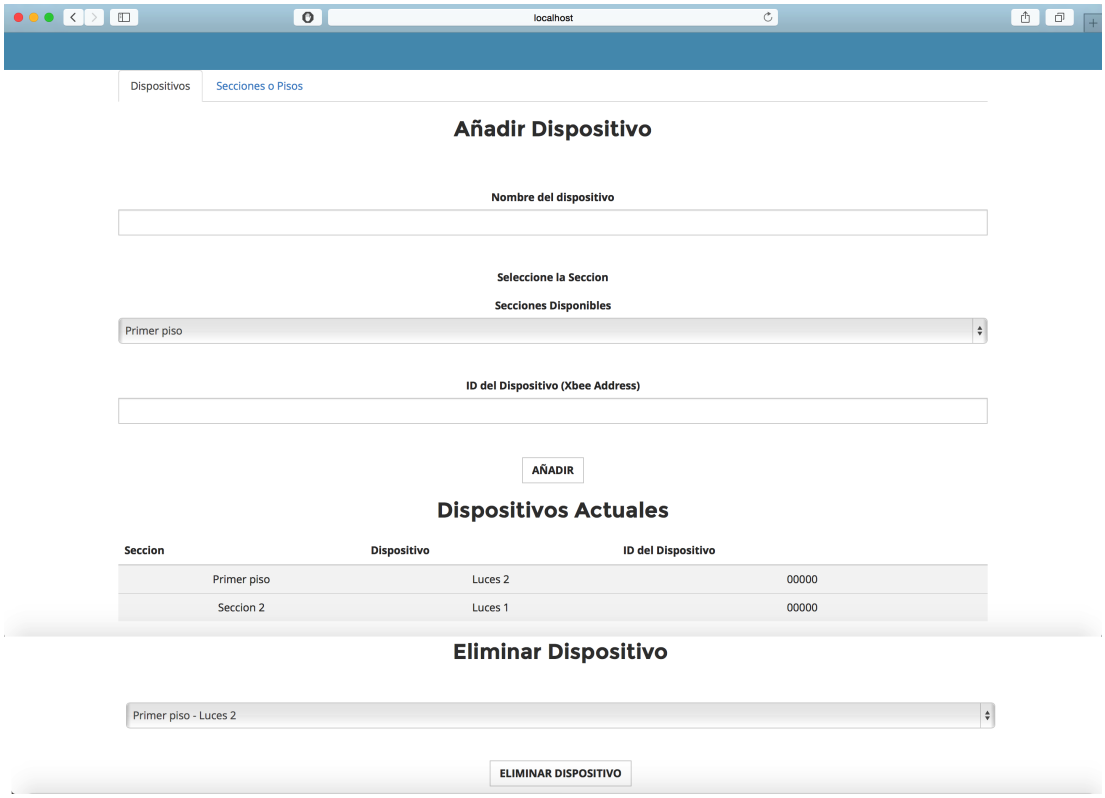


Figura 2.20: Sección para Añadir o Eliminar Dispositivos. Fuente: Los Autores.

En la Figura 2.20 se muestra la sección para agregar dispositivos, la cual consta de tres campos importantes:

- Nombre del Dispositivo
- Sección o Piso: En esta parte se despliega una lista con las secciones o pisos que se encuentran actualmente en la base de datos

- ID del Dispositivo: Aquí se debe ingresar la dirección de 64 bits del módulo Xbee del dispositivo final, esta parte es muy importante ya que para el envío de tramas la dirección del módulo es extraída de esta misma base de datos.

Luego de estos campos se encuentra una tabla con de todos los dispositivos que se encuentran actualmente en la base de datos, con su respectiva sección a la cual pertenecen y su ID de dispositivo.

Finalmente para eliminar un dispositivo en la parte final de la pagina se despliega una lista con todos los dispositivos, para lo cual se selecciona el dispositivo a eliminar y se da click en el botón, removiéndolo así de la base de datos.

En la Figura 2.21 se muestra la segunda parte de la pagina, en la cual se puede agregar secciones o pisos, la cual consta de un campo para ingresar el nombre de la sección a agregarse.

También se muestra una tabla con las secciones o pisos disponibles en la base de datos.

Por último se tiene una lista desplegable con las secciones, si se desea eliminar alguna de ellas.

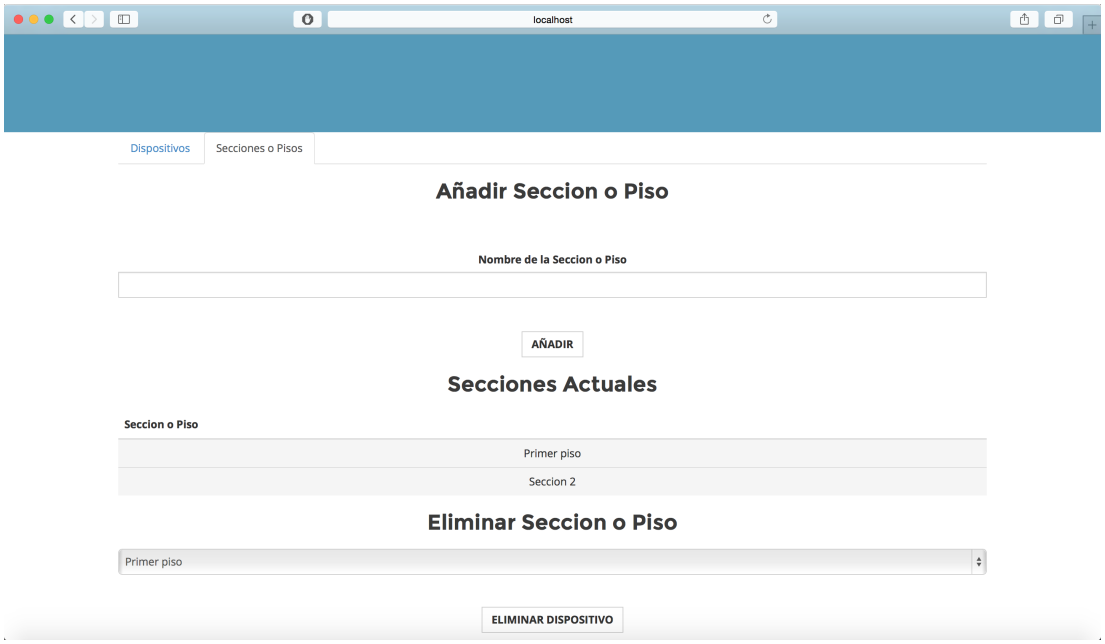


Figura 2.21: Sección para Anadir o Eliminar Pisos. Fuente: Los Autores.

2.3.2. Base de Datos

Los dispositivos y secciones así como también los usuarios de la pagina web están almacenados en una base de datos implementada en MySQL, el cual es un sistema de gestión de base de datos Open Source y está montado en el Raspberry Pi.

Para la creación de la base de datos y las tablas que contiene se uso la herramienta también de libre distribución phpmyadmin la cual la cual provee un entorno gráfico y sencillo para la administración de MySQL.

A continuación se detallan las bases de datos y tablas usadas:

- Control de Usuarios (Figura 2.22)
    - Base de datos: usuarios
    - Tablas: usuario

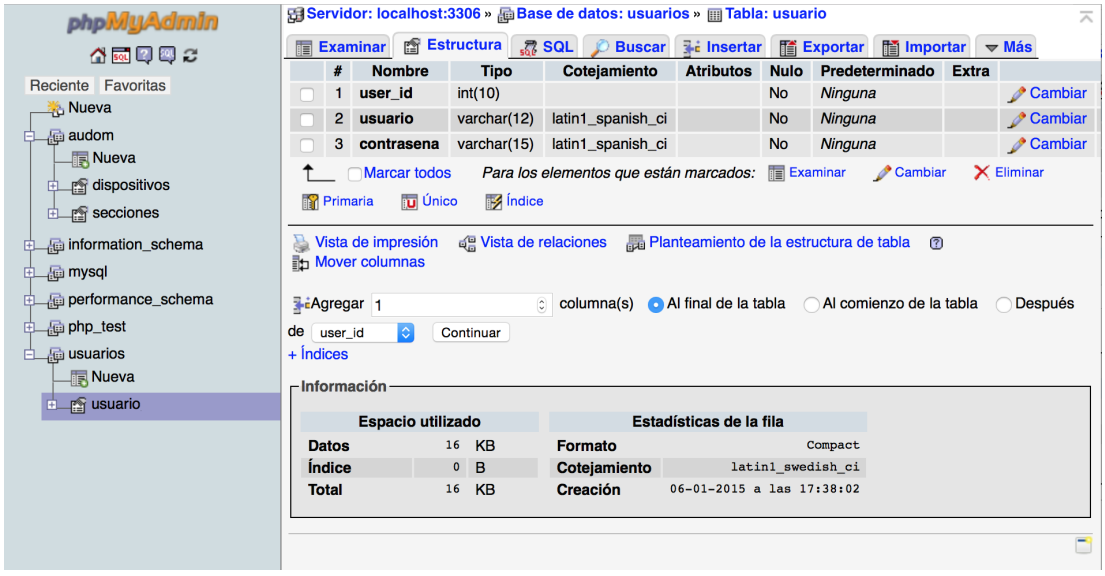


Figura 2.22: Tabla de Control de Usuarios de la Base de Datos. Fuente: Los Autores.

- Dispositivos y Secciones (Figura 2.23)
    - Base de datos: audom
    - Tablas: dispositivos, secciones.

Los datos que se almacenan en la tabla son creados a partir de la pagina de administración según las necesidades del usuario, estos datos son usados para cargar la página de usuario, así como también para el procesamiento de las tramas que van a ser manejadas por el coordinador, esto se explica con más detalle en la siguiente sección.

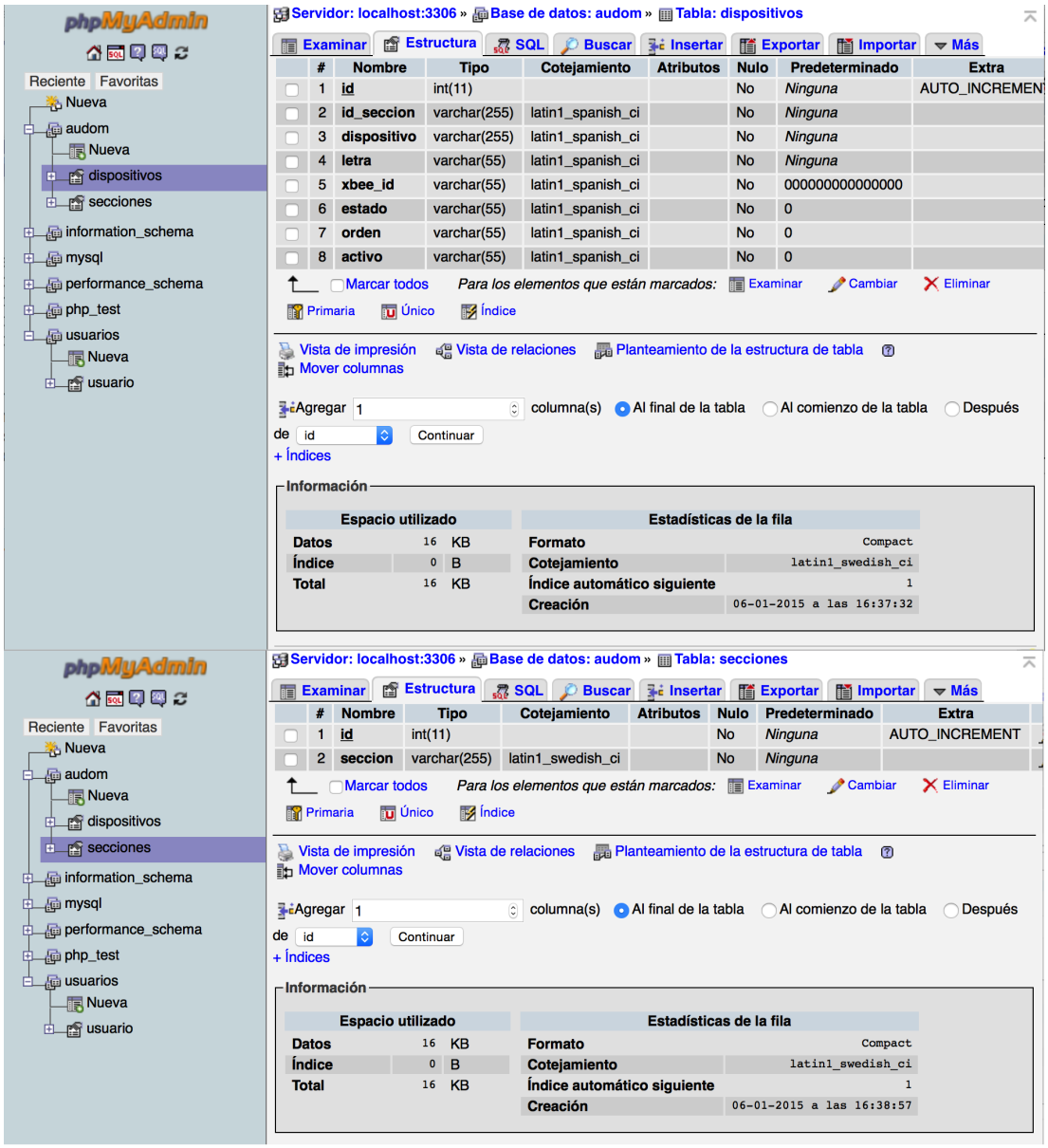


Figura 2.23: Tabla de Dispositivos y Secciones de la Base de Datos. Fuente: Los Autores.

2.3.3. Conexión con la Red ZigBee

La conexión entre el Raspberry Pi y el módulo coordinador Xbee está realizada mediante el puerto serie UART del Raspberry Pi.

Para el desarrollo de los scripts que manejaran las tramas se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Tanto para el encendido como para el apagado de la luminaria se envía una trama desde el coordinador al dispositivo final que se desea controlar.
- Si el encendido o apagado es manual, una trama es enviada desde el dispositivo final hacia el coordinador.

2.3.3.1. Puertos y Tramas.

Con las consideraciones antes mencionadas, se usaron tres puertos del módulo Xbee correspondiente al dispositivo final:

- DIO1: Envía una trama al coordinador cuando este cambia de estado ya sea de cero a uno o viceversa
- DIO2: Enciende o apaga el relé de estado solido normalmente cerrado
- DIO4: Enciende o apaga el relé de estado solido normalmente abierto.

La trama es armada de la siguiente manera y será enviada desde el coordinador:

7E 00 10 17 01 XX XX XX XX XX XX XX XX FF FE 02 44 34 04 6C

- 7E: Delimitador inicial de la trama
- 00 10: Numero de bytes entre este campo y el campo checksum
- 17: Tipo de trama, en este caso será siempre 17 ya que corresponde a una trama API.
- 01: Identificación de la trama.
- XX XX XX XX XX XX XX XX: Dirección de 64 bits del módulo del dispositivo final

- FF FE: Dirección de 16 bits del dispositivo final, en este caso el valor FF FE permite una transmisión en broadcast hacia todos los dispositivos.
- 02: Este valor le indica al dispositivo final que aplique los cambios enviados en la trama
- 44 34: Nombre del comando a modificar en hexadecimal en este caso el valor corresponde al comando D4
- 04: Parámetro a ser asignado al comando, 04: Apagado (puerto en 0), 05: Encendido (puerto en 1)
- 6C: Checksum de la trama, este valor varia según los valores de la trama.

La trama que recibe el coordinador si se acciona manualmente indica el estado del puerto DIO.

2.3.3.2. Script en Python

Una vez asignados los puertos y entendidas las tramas a usarse se procedió al desarrollo de los scripts en Python, de manera que se cumplan las condiciones establecidas en el diseño y las tablas de verdad del actuador de iluminación.

Se uso la librería XBee 2.1.0 de Python, la cual permite armar las tramas de una manera rápida con pocas lineas de código, con los siguientes comandos:

- xbee.remote_at(dest_addr_long=add,command='D4',parameter='\x05')
  - xbee: variable que especifica el puerto serial donde está conectado el dispositivo
  - remote_at: indica el tipo de trama a enviarse (trama Zigbee API)
  - dest_addr_long: Dirección de 64 bits del dispositivo final (en este caso está almacenada en la variable add)

- command: comando a modificar
- parameter: parámetro a escribir.

El primer script escucha el puerto serial en espera de tramas provenientes desde el dispositivo final, de este modo cada ves que se acciona manualmente el actuador, la trama es interpretada y devuelve el estado del puerto DIO1, ya sea True o False, y dependiendo del estado de la luminaria, el cual está almacenado en la base de datos, manda a encender o apagar la misma según las condiciones de la tabla de verdad.

Del mismo modo al cambiar el estado ya sea de encendido a apagado o viceversa, el script actualiza el estado en la base de datos, por lo tanto si se acciono manualmente, el estado se ve reflejado en la pagina web del usuario.

En el segundo script, se encuentra implementado un servidor websocket nativo de Raspberry Pi , el cual escucha e interpreta las peticiones PHP que se dan al hacer click en el encendido o apagado de la luminaria, aquí dependiendo del dispositivo seleccionado, recupera la dirección de 64 bits desde la base de datos y envía las tramas correspondientes según la tabla de verdad.

Capítulo 3

PRUEBAS

3.1. Prueba Red ZigBee

En esta sección de pruebas los módulos XBee se operan utilizando la interfaz serial-usb hacia el computador, previo a estas se realizó la configuración descrita en el Capítulo II, considerando el caso más simple de la red: Un Coordinador, un enrutador y un dispositivo final.

3.1.1. Establecimiento de la Red ZigBee

Para comprobar el establecimiento de la red ZigBee se utilizó tres exploradores XBee, tres módulos XBee Series 2 y el programa X-CTU mediante el cual se realizó las configuraciones de cada módulo para cada tipo de dispositivo ZigBee de la red y mediante sus herramientas se realizó la prueba de conexión y establecimiento de la red que se puede ver en la Figura 3.2.

Figura 3.1: Módulos Xbee Pro Series 2 usados en las pruebas de la Red ZigBee. Fuente: Los Autores.

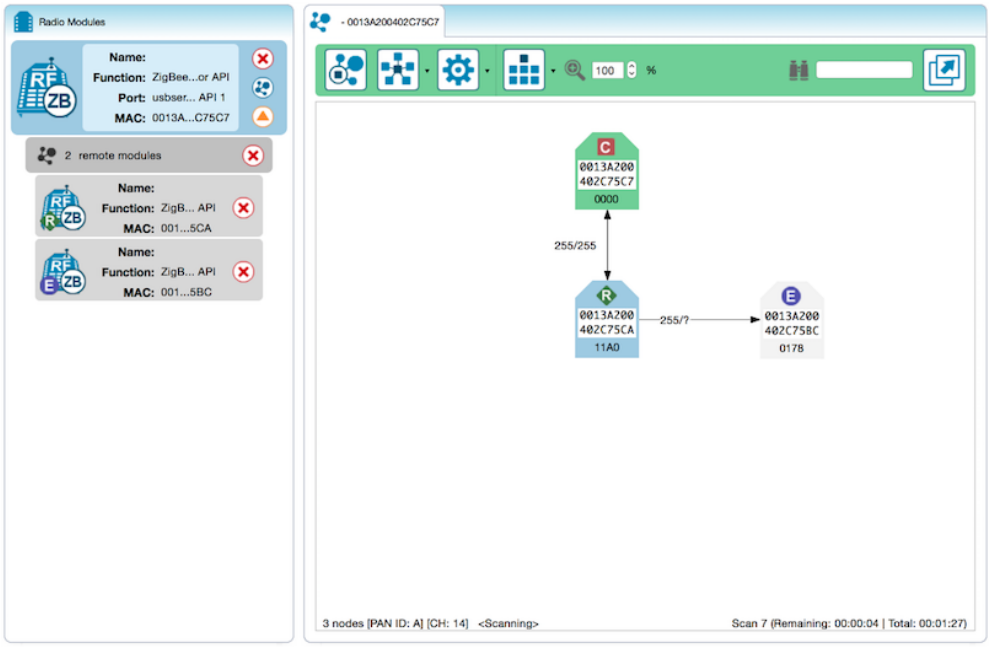


Figura 3.2: Enlace entre módulos XBee con LQI. Fuente: Los Autores.

Dentro de la herramienta X-CTU se utiliza la pestaña de Network Working Mode (Modo de Operación de Red) en el cual se muestra gráficamente los enlaces existentes entre los nodos ZigBee. Se puede ver la dirección de cada módulo en la sección blanca de cada representación de dispositivo, además se tienen dos valores entre cada módulo que representa el LQI o Indice de Calidad de Enlace; un valor de 255 representa la máxima calidad de enlace entre nodos mientras que un valor de 200 representa aproximadamente 80 % de confiabilidad en la recepción de un paquete sin alteraciones.

Como se puede ver en la figura anterior, se establece la red ZigBee con PAN ID: A, tres nodos y una calidad de enlace máxima o LQI = 255. entre los tres módulos XBee Pro Series 2.

El proceso que realiza el coordinador para el establecimiento del enlace es el siguiente:

- Primero comprueba el PAN ID y Canal en el que está operando el coordinador, además si este se encuentra en el modo API.
- A continuación el coordinador envía una trama en broadcast hacia todos los dispositivos en el mismo PAN ID y Canal.
- Si el paquete que fue enviado es recibido por los demás dispositivos, estos envían una trama de respuesta, en la que se especifica su dirección de red de 64 bits y la ruta.
- Estas direcciones de red a su vez son almacenadas en cada nodo, en las tablas de enrutamiento, entendiendo como nodo a cada enrutador.
- Si un dispositivo final se conecta directamente al coordinador su dirección de red y ruta serán almacenados en la tabla de enrutamiento del coordinador.
- Los dispositivos finales se conectan al enrutador o al coordinador dependiendo de la calidad de enlace entre los mismos, es decir si se tienen un coordinador, un enrutador y un dispositivo final en una misma red el dispositivo final se conectara al módulo con el que tenga una mejor calidad de enlace.

3.1.2. Envío de Paquetes de Prueba

Para comprobar la conexión se enviaron dos paquetes de prueba desde el coordinador hacia el dispositivo final, el primer paquete configura el puerto DIO4 del dispositivo final en 1 y el segundo paquete configura el puerto en 0.

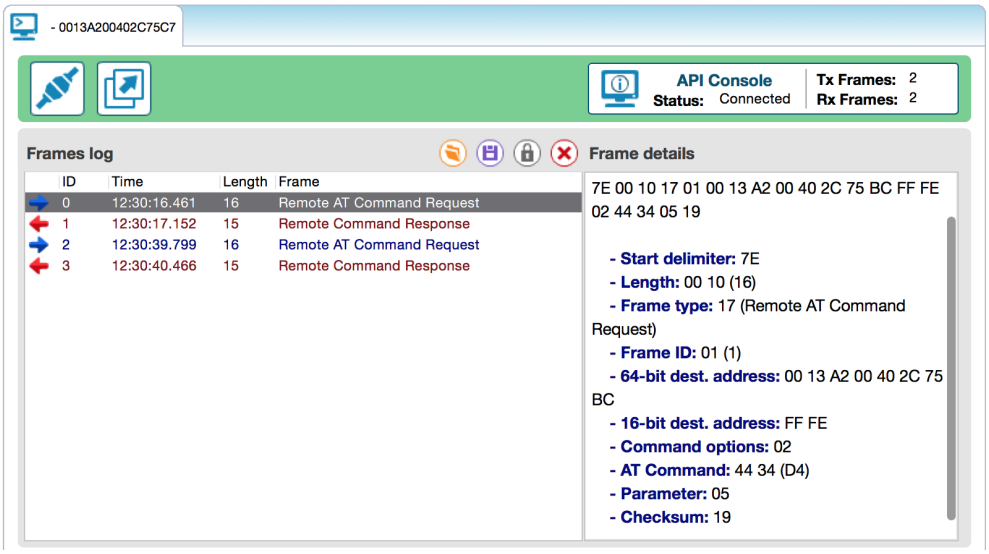


Figura 3.3: Modo de Consola de X-CTU mostrando el envío de paquetes de prueba. Fuente: Los Autores.

En la Figura 3.3 se muestra el envío de la trama y la respuesta del dispositivo. En los detalles se puede observar la estructura de la trama, en donde se especifica la dirección de 64 bits de destino el puerto a configurar y el parámetro (05) el cual configura el puerto en 1. Si la trama fue recibida por el dispositivo final este envía al coordinador una trama de respuesta la cual se puede observar en la Figura 3.4. En esta trama se indica si los cambios fueron aplicados, como se observa en los detalles de la trama el status es 00 (Status OK).

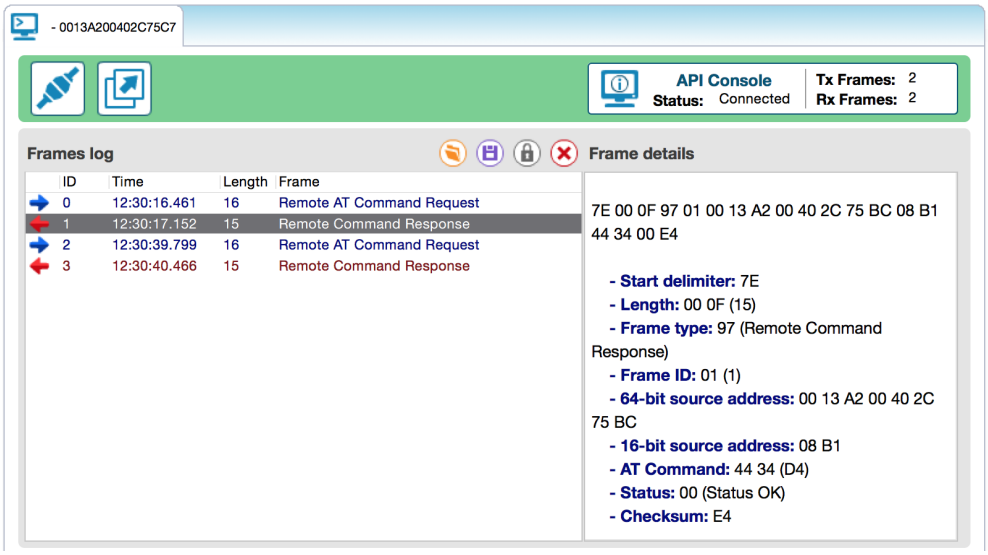


Figura 3.4: Modo de Consola de X-CTU mostrando la respuesta al envío de paquetes de prueba. Fuente: Los Autores.

3.2. Pruebas de Hardware

Para realizar las pruebas de hardware se procedió a conectar los módulos XBee a la red ZigBee mediante los circuitos impresos realizados anteriormente, poniéndolos en situaciones similares a las que podrían presentarse en un domicilio o edificio tales como: Distancias largas, paredes y transmisión entre pisos. Como en la sección 3.1, se realizan pruebas básicas de establecimiento de la red, de alcance y rendimiento para determinar las pérdidas presentes en un caso aproximado al real bajo condiciones controladas.

3.2.1. Prueba de Establecimiento de la Red ZigBee

Para comprobar el establecimiento de red se conectó el enrutador a la herramienta X-CTU, y el coordinador y el dispositivo final a los circuitos impresos diseñados.

El proceso de establecimiento de red es el mismo ya indicado en la sección anterior, con la única diferencia que es generada desde el enrutador por cuestiones de demostración, la siguiente figura muestra el establecimiento de red usando el hardware diseñado.

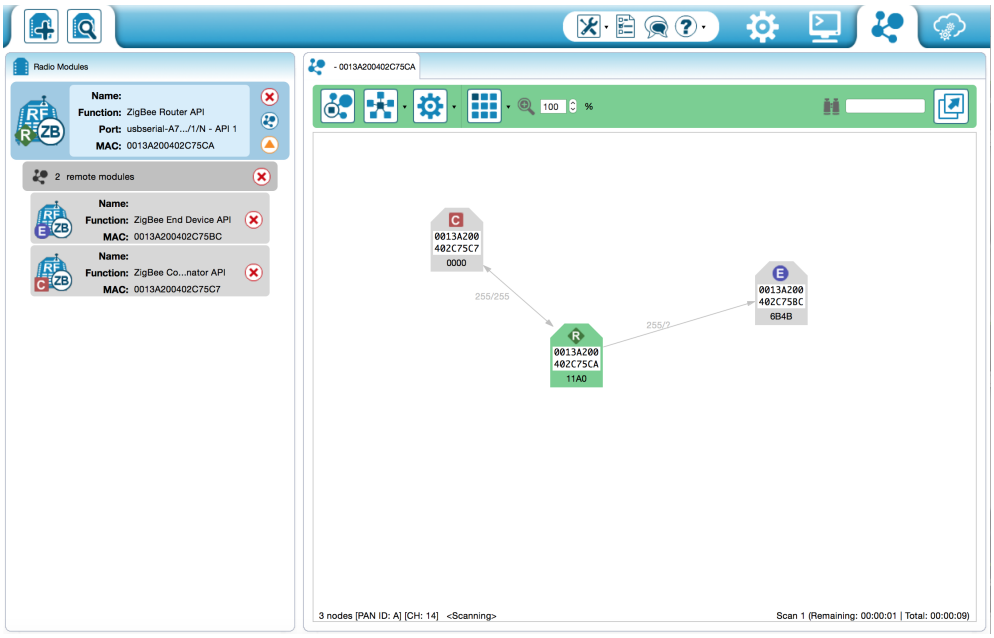


Figura 3.5: Establecimiento de la Red ZigBee en X-CTU utilizando los Circuitos Impresos junto con los Módulos XBee. Fuente: Los Autores

3.2.2. Pruebas de Alcance y Distancias Máximas

Para probar los rangos de alcance y distancias máximas del sistema se considera dos casos: con línea de vista y con obstáculos. Se realizó pruebas entre: coordinador y dispositivo final, coordinador y enrutador y coordinador, enrutador y dispositivo final para cada caso; a continuación se presentan los resultados obtenidos mediante la medición de rango presente en el programa X-CTU mediante la herramienta Range Test de Digi International y la distancia medida por los autores. Se presenta de igual manera pruebas con los dispositivos en diferentes pisos para simular un caso real. Las pruebas con línea de vista y con obstáculos fueron realizadas en el mismo piso. Como se puede notar en las gráficas presentadas tanto de las pruebas con línea de vista como en las pruebas con obstáculos, la conexión se mantiene mientras el porcentaje de paquetes recibidos sea mayor al 82 %, una vez que baja de este valor se considera que la conexión es inestable y que se ha sobrepasado el área de cobertura. En los casos de pruebas donde intervienen los tres tipos de dispositivos ZigBee se puede notar que los valores de RSSI (Indicador de Fuerza de Señal Recibida) local es diferente al valor remoto, esto se debe a que el valor RSSI remoto pertenece al enlace entre el Dispositivo Final y el Enrutador, mientras que el RSSI remoto pertenece al enlace entre el Coordinador y el Enrutador. Para todas las pruebas se utilizan los módulos con las direcciones mostradas en la siguiente figura:

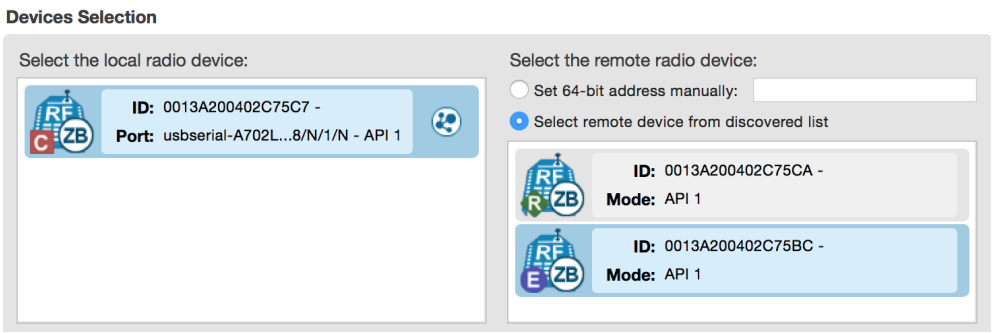


Figura 3.6: Módulos XBee y direcciones utilizadas en las pruebas usando la herramienta Range Test de X-CTU. Fuente: Los Autores.

3.2.2.1. Pruebas de Alcance y Distancias Máximas con Línea de Vista

Estas pruebas se realizaron en un terreno uniforme sin obstáculos y bajo condiciones climáticas favorables. Cada prueba se empezó con los dispositivos juntos y luego se movilizó uno de ellos hasta perder la conexión con la red ZigBee, una vez alcanzado ese punto se regresó hasta la última distancia que se mantuvo conexión y se procedió a medir la distancia lineal usando un odómetro.

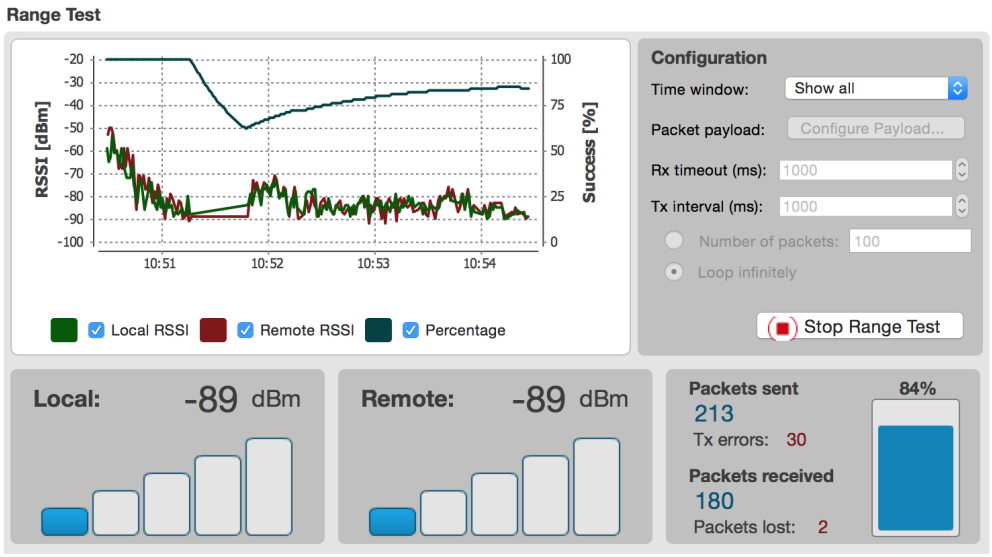


Figura 3.7: Prueba de alcance entre Coordinador y Dispositivo Final con línea de vista. Fuente: Los Autores.

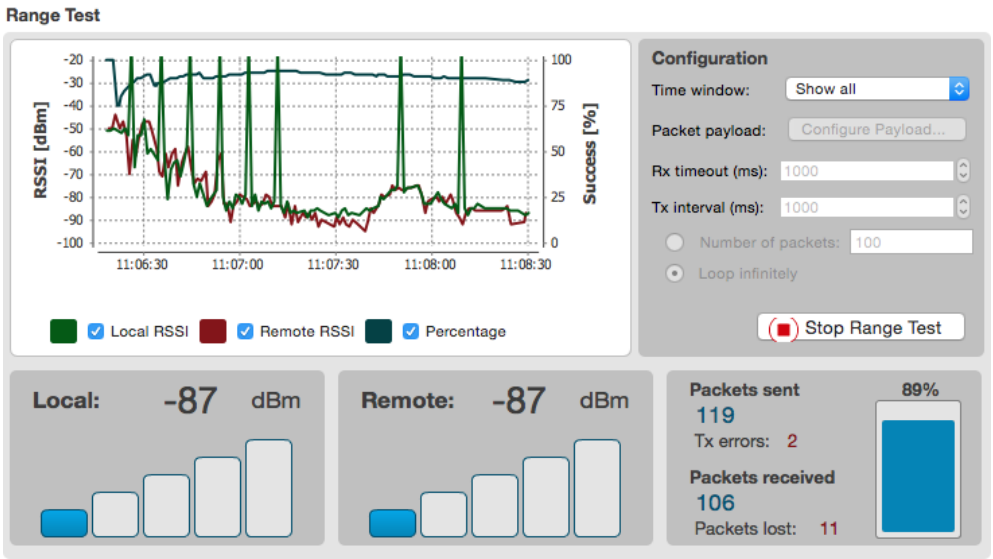


Figura 3.8: Prueba de alcance entre Coordinador y Enrutador con línea de vista. Fuente: Los Autores.

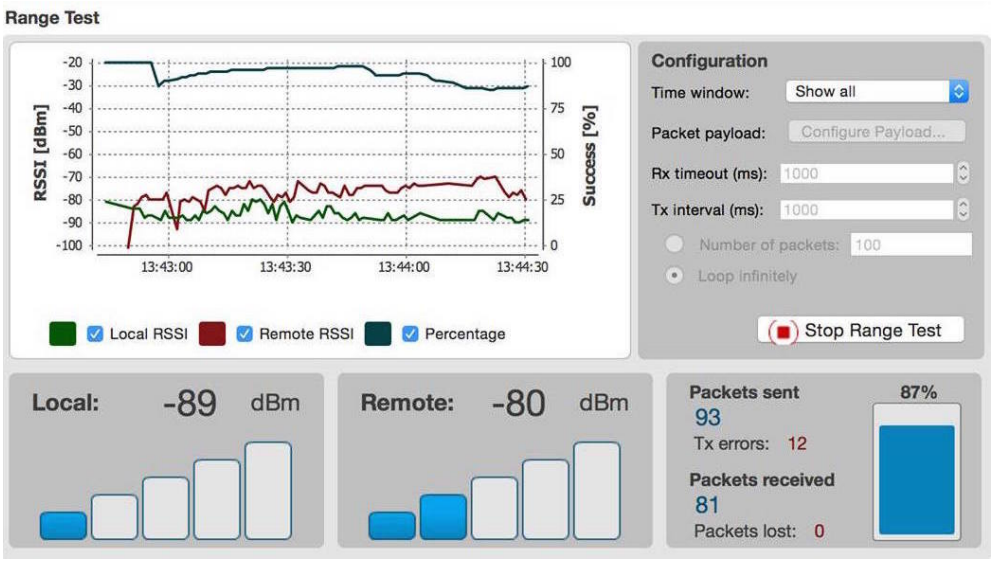


Figura 3.9: Prueba de alcance entre Coordinador, Enrutador y Dispositivo Final con línea de vista. Fuente: Los Autores.

La distancia lineal medida fue de 96,4m entre Coordinador y Dispositivo Final, 95,7m entre Coordinador y enrutador y 210,9m entre Coordinador y Dispositivo Final pasando por un enrutador en el medio.

3.2.2.2. Pruebas de Alcance y Distancias Máximas con Obstáculos

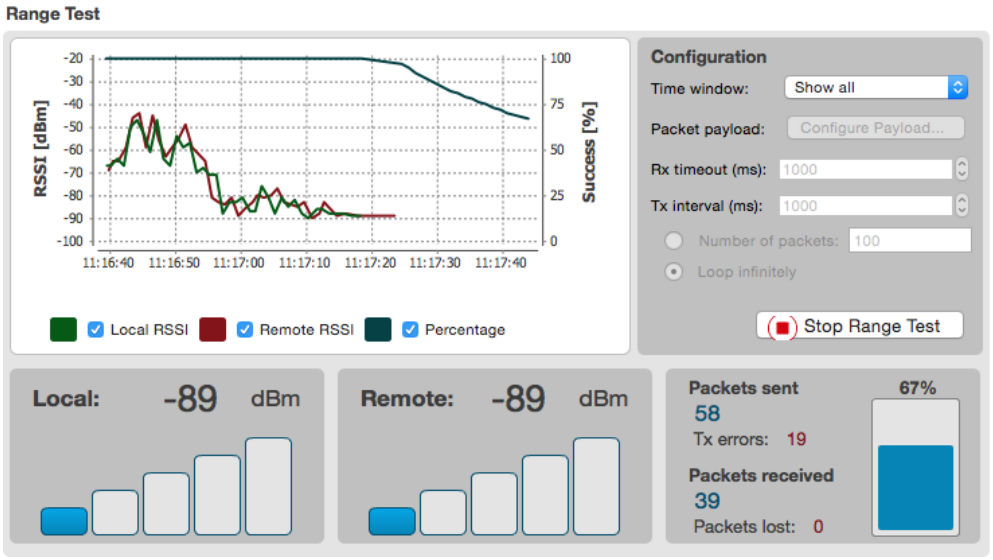


Figura 3.10: Prueba de alcance entre Coordinador y Dispositivo Final con obstáculos. Fuente: Los Autores.

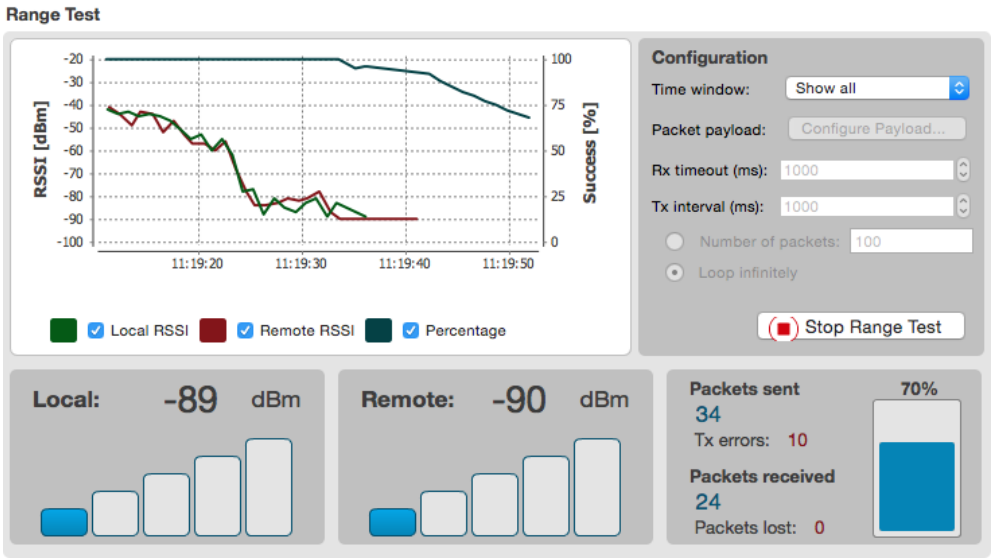


Figura 3.11: Prueba de alcance entre Coordinador y Enrutador con obstáculos. Fuente: Los Autores.

La distancia lineal medida fue de 15,3m entre Coordinador y Dispositivo Final y 14,1m entre Coordinador y enrutador ambos pasando por dos paredes de ladrillo.

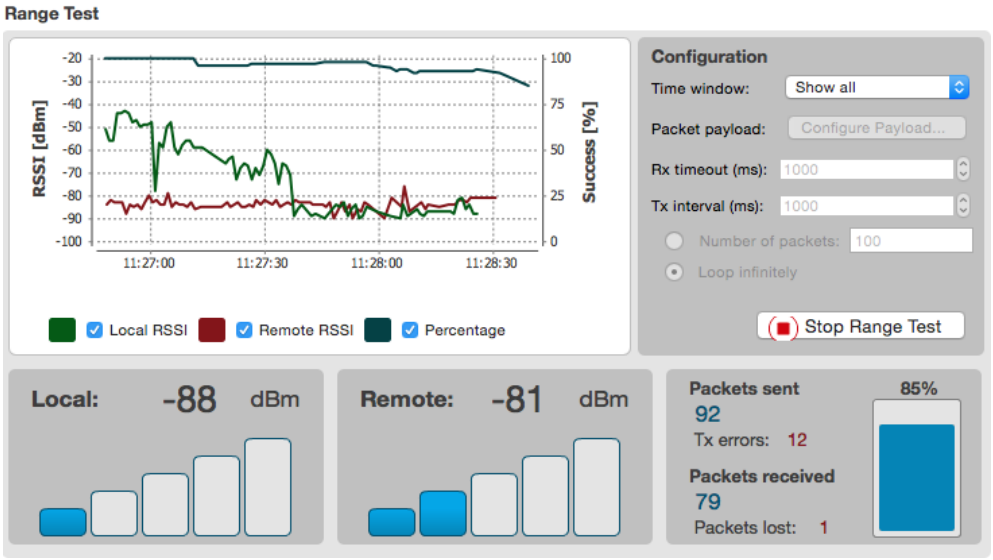


Figura 3.12: Prueba de alcance entre Coordinador, Enrutador y Dispositivo Final con obstáculos. Fuente: Los Autores.

La distancia lineal medida fue 32,7m entre Coordinador y Dispositivo Final con un enrutador en el medio pasando por cinco paredes de ladrillo.

3.2.2.3. Pruebas de Alcance y Distancias Máximas entre Pisos

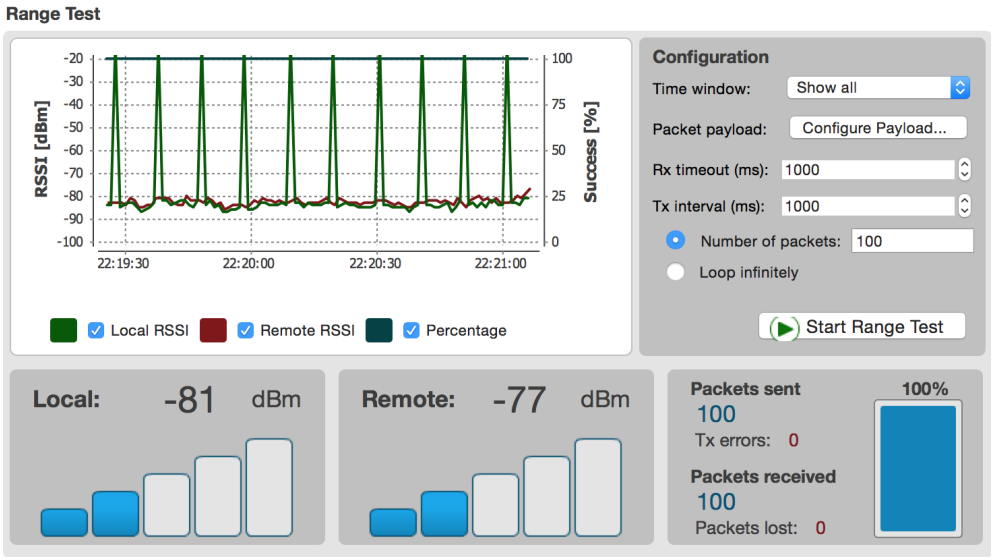


Figura 3.13: Prueba de alcance entre Coordinador y Dispositivo Final entre planta baja y primer piso. Fuente: Los Autores.

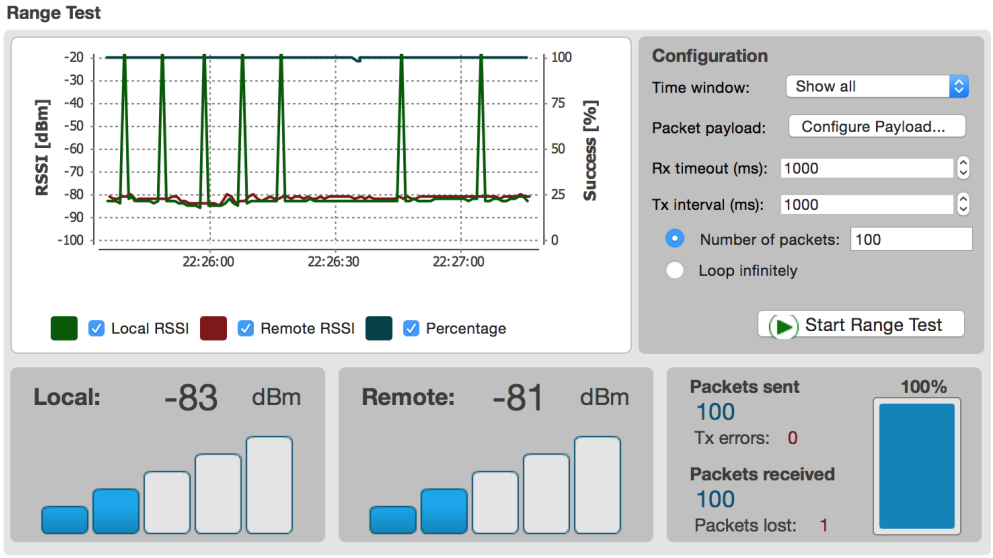


Figura 3.14: Prueba de alcance entre Coordinador y Enrutador entre planta baja y primer piso. Fuente: Los Autores.

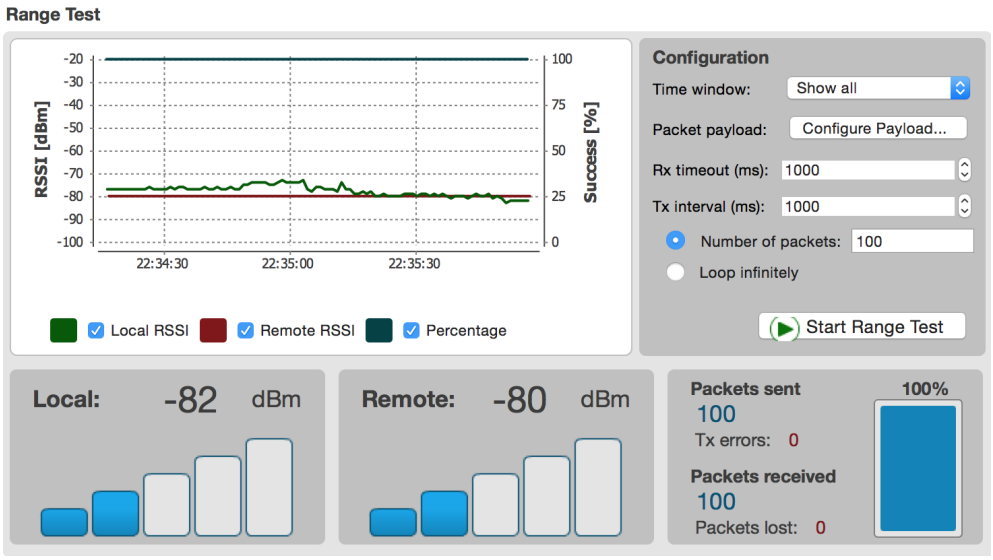


Figura 3.15: Prueba de alcance entre Coordinador, Enrutador y Dispositivo Final entre planta baja, primer piso y segundo piso. Fuente: Los Autores.

Estas pruebas se realizaron en un domicilio que entre pisos posee loza de fundición y una altura por piso de alrededor de 2,40m.

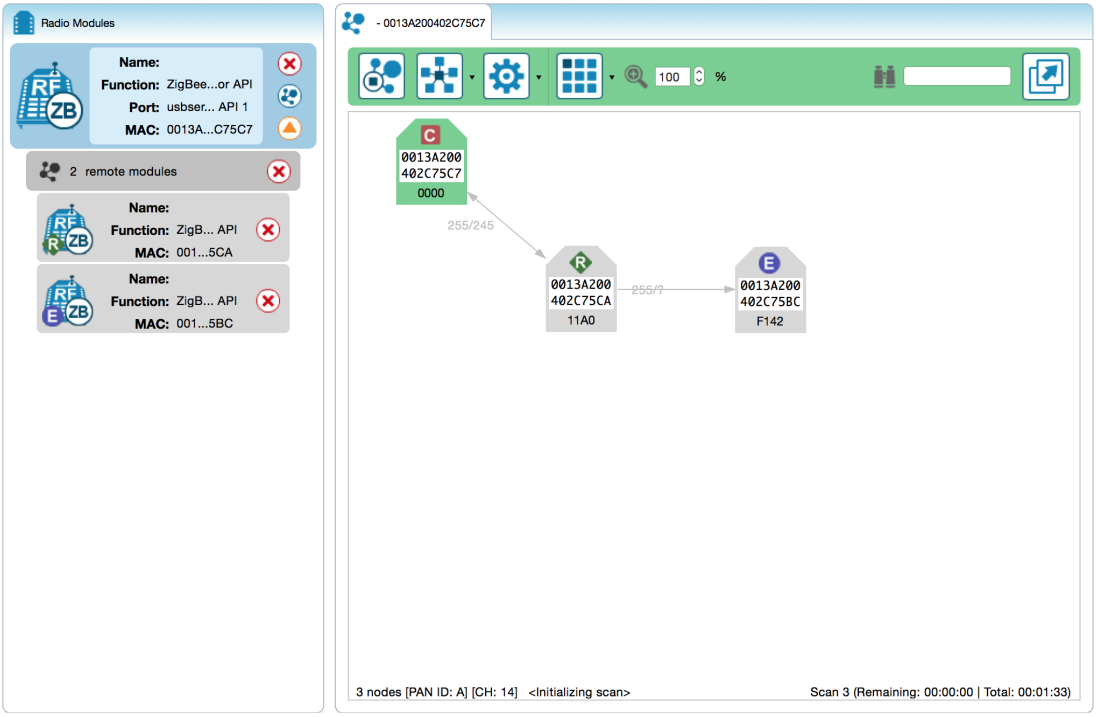


Figura 3.16: Prueba de enlace entre Coordinador, Enrutador y Dispositivo Final entre planta baja, primer piso y segundo piso. Fuente: Los Autores.

3.3. Pruebas del Actuador de Iluminación

El actuador de iluminación fue diseñado para reemplazar los existentes interruptores domésticos y proveer así el control de las luminarias sin afectar el cableado eléctrico interno del sitio de instalación. Para realizar las pruebas se lo colocó en una pared común de ladrillo reemplazando un interruptor y se le sometió a los diferentes casos posibles de luminarias a controlar para así probar que tanto el circuito de control como el circuito de potencia cumplen con lo estipulado en el diseño.

3.3.1. Pruebas Generales

Para estas pruebas se tuvo en consideración las tablas de verdad presentadas en el capítulo anterior para probar todos las combinaciones posibles utilizando el control físico presente en el actuador físico y el control mediante la página web.

3.3.2. Prueba de Rendimiento

El actuador de iluminación está alimentado por medio de una batería, por lo que es necesario realizar un cálculo de la duración de la misma, para este cálculo tenemos los siguientes parámetros a considerar:

- Datos del módulo Xbee:
    - Corriente consumida en modo sleep: 3.5uA
    - Corriente consumida en modo recepción: 47mA
    - Corriente consumida en modo transmisión: 205mA
    - Capacidad de la batería: 2200mAh

Estos datos se obtuvieron de la hoja de datos provista por el fabricante del módulo, Digi. Inc.

- Datos de configuración del módulo Xbee:
  - Tiempo en modo Sleep: 3s
  - Tiempo de recepción: 5ms
  - Tiempo de transmisión: 5ms

Estos datos fueron configurados en el módulo Xbee del actuador de iluminación, en la siguiente figura se muestran estos datos:

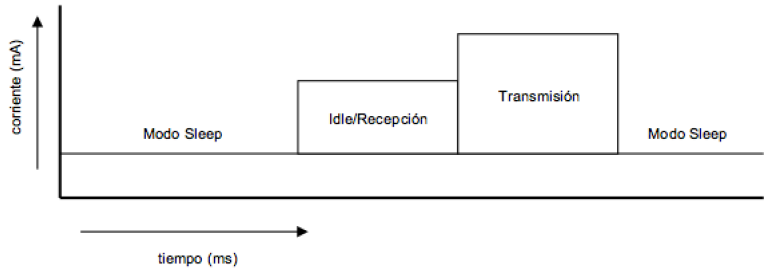


Figura 3.17: Gráfica de tiempos de funcionamiento del módulo XBee del Actuador de Iluminación. Fuente: Los Autores.

Las siguientes formulas son provistas por el fabricante para el cálculo de la duración de la batería. [Finlinson, 2005]

- Corriente consumida en un ciclo:
  - $C = \frac{(ts*cs+tr*cr+tt*ct)}{(ts+tr+tt)}$
    - Donde:
    - ts = tiempo en modo sleep en ms
    - cs = corriente en modo sleep en mA
    - tr = tiempo en modo recepción en ms
    - cr = corriente en modo recepción en mA
    - tt = tiempo en modo transmisión en ms
    - ct = corriente en modo transmisión en mA

- Duración de la batería en meses:
  - $Bl(meses) = \frac{Bc*1hr(ms)}{C*1mes(ms)} * Eff(\%)$
    - Donde:
    - Bl = Duración de la batería en meses
    - Bc = Capacidad de la batería instalada
    - C = corriente consumida en un ciclo
    - Eff(%) = Eficiencia de la batería (para una batería de litio por lo general es del 80%)

A continuación aplicando las formulas se procede al cálculo de la duración de la batería para el actuador de iluminación:

- $C = \frac{(3000*0.0035+5*47+5*205)}{3000+5+5} = 0,422mA$
- $Bl(meses) = \frac{2000*3600000}{0.422*2592000000} * 80\% = 5,26meses$

Teóricamente y asumiendo que la eficiencia de la batería instala es del 80% la duración es de 5,26 meses, luego de este tiempo la batería debe ser recargada.

3.4. Pruebas del Servidor Web

En esta sección se muestran las pruebas realizadas al servidor web tomando en cuenta que el este debe ser accesible tanto desde la red local como desde internet, para asegurar así el control de las luminarias en todo momento y desde cualquier lugar con conexión a internet.

3.4.1. Pruebas de Acceso

3.4.1.1. Acceso Interno

Como se explica en secciones anteriores el servidor web montado en el Raspberry Pi, se encuentra conectado por medio de un patch core a la red local del domicilio, el cual tiene asignado una IP fija de la red local.

Para el acceso a la pagina web se ingresa la dirección IP del servidor, en cualquier explorador de internet ya sea en un computador, una tablet o smartphone.

En la siguiente figura se muestra el acceso desde la red local desde tres dispositivos diferentes:

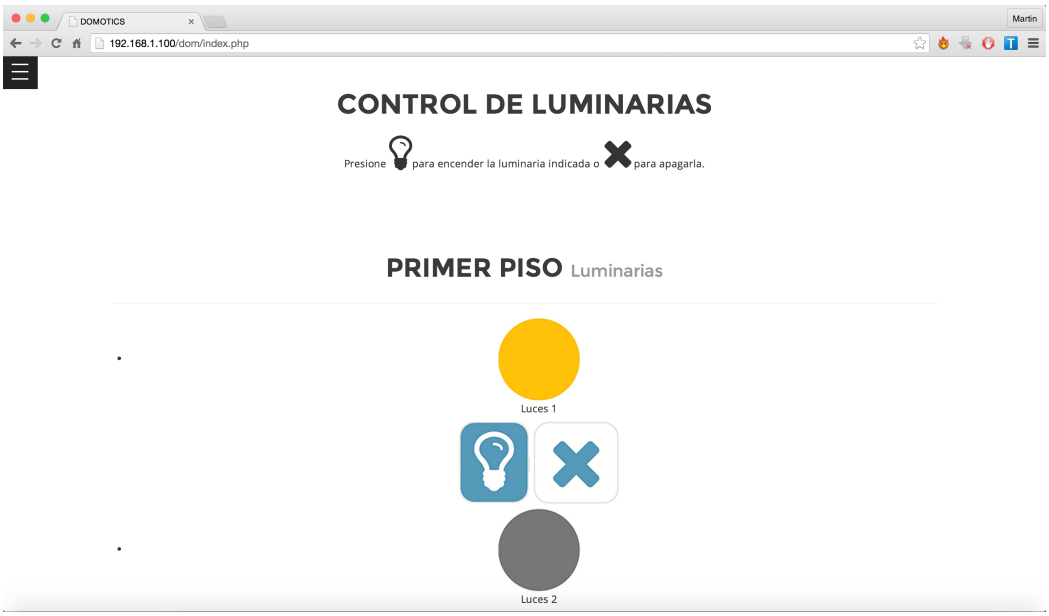


Figura 3.18: Acceso a la Red desde Mac OS. Fuente: Los Autores.

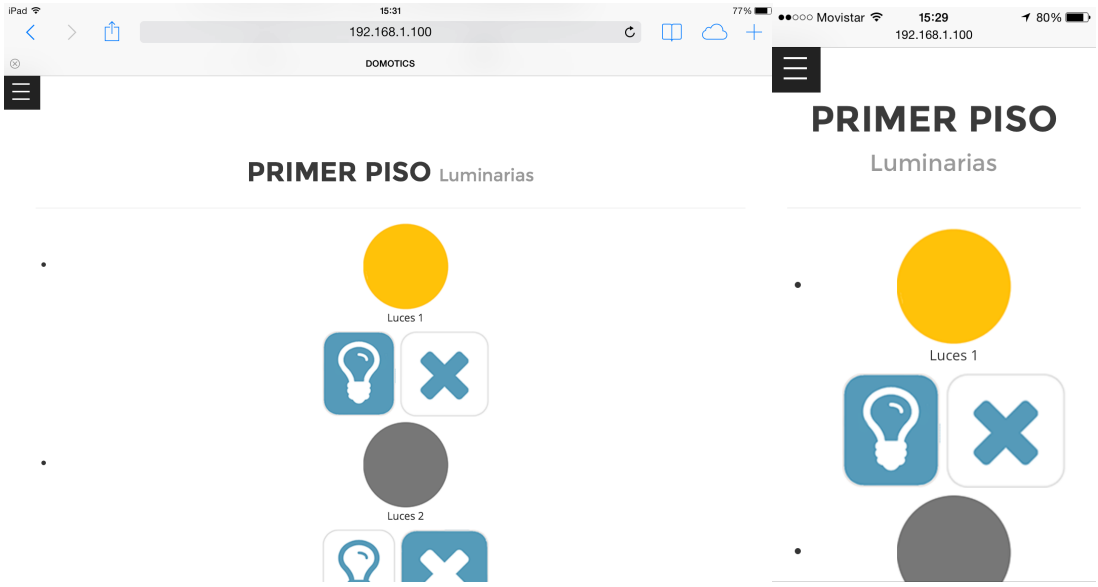


Figura 3.19: Izquierda: Acceso a la Red desde iOS iPad. Derecha: Acceso a la Red desde iOS iPhone. Fuente: Los Autores.

De esta manera el servidor es accesible siempre y cuando el dispositivo desde el cual se quiere acceder este conectado a la red local.

3.4.1.2. Acceso Externo

El acceso externo es decir desde internet se da por medio de la IP publica que asigna el proveedor de internet ya sea al domicilio o al lugar de implementación, para esto se debe configurar el modem del proveedor para que redireccione el la IP publica a la IP local en la cual está montado el servidor.

Una ves realizada la configuración de redireccionamiento, se puede acceder desde internet a través de la IP publica del proveedor, lo que genera un nuevo problema ya que la mayoría de proveedores utilizan una IP dinámica es decir cada vez que se reinicia el modem la IP publica cambia.

Figura 3.20: Acceso Externo a la Red, Fuente: Los Autores.

Para solucionar este problema se utilizo una herramienta gratuita llamada NO-IP la cual es instalada en el Raspberry Pi y se encarga de actualizar la IP publica del proveedor cada vez que ésta cambie, y ésta es asignada automáticamente a un dominio que también es provisto por la misma herramienta.

De esta manera el acceso externo se da mediante el dominio http://audomotics.ddns.net, en la siguiente figura se muestra el acceso desde un smartphone con internet móvil, la dirección IP que aparece es la IP publica ya redireccionada desde el dominio mencionado anteriormente.

3.5. Pruebas del Sistema Final

En esta sección se realizó las pruebas finales del sistema instalado en un domicilio, se siguió como referente a las pruebas anteriores para confirmar que el sistema se encontraba funcionando correctamente tanto en partes como en conjunto y se analizo

los diferentes escenarios posibles en un caso real de uso domiciliario para tenerlo a consideración en el ensayo de funcionamiento.

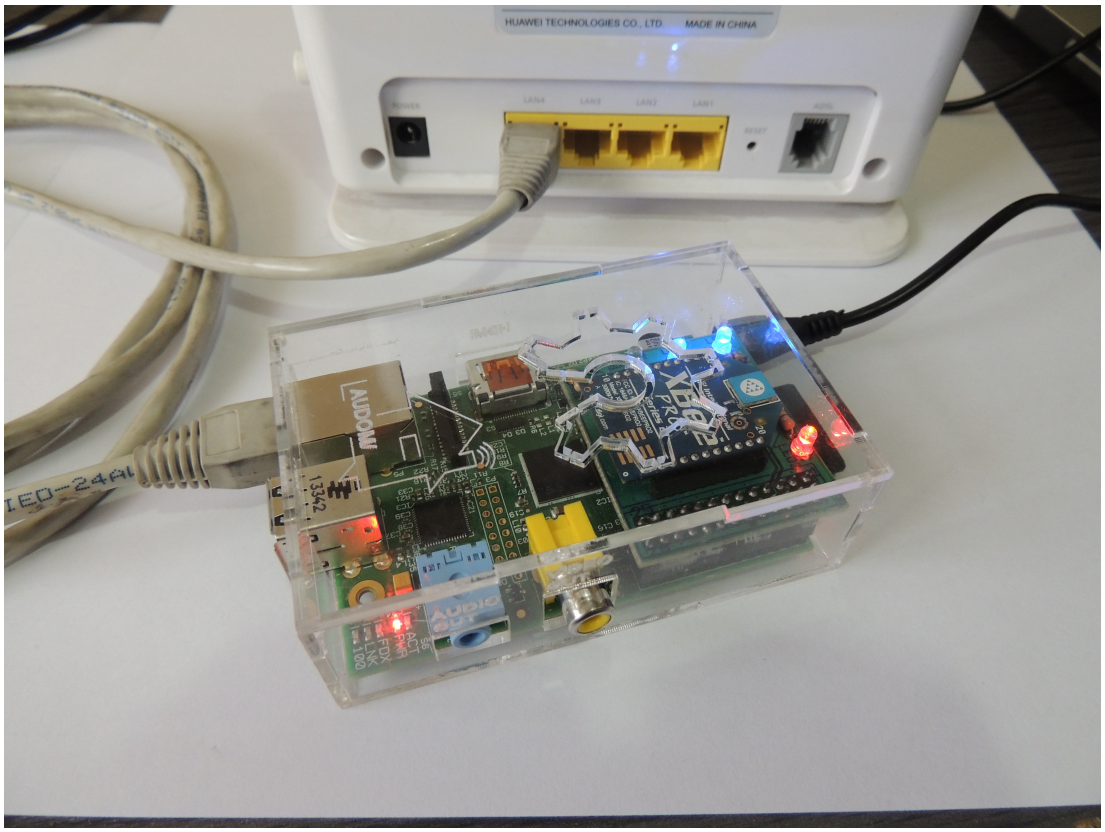


Figura 3.21: Coordinador terminado e instalado. Fuente: Los Autores.

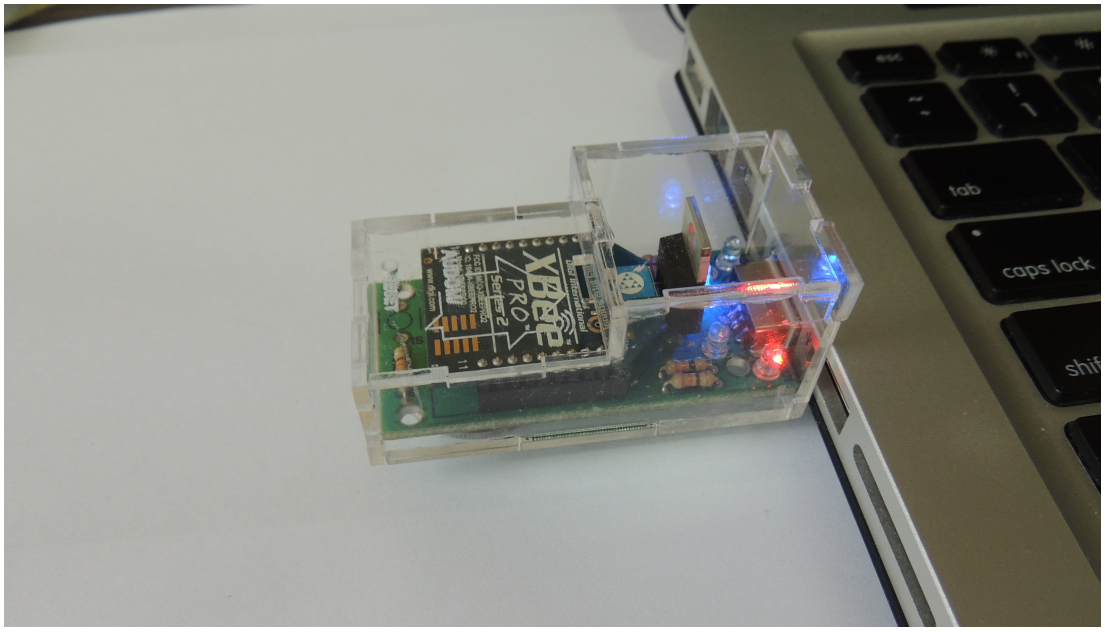


Figura 3.22: Enrutador Terminado e instalado. Fuente: Los Autores.

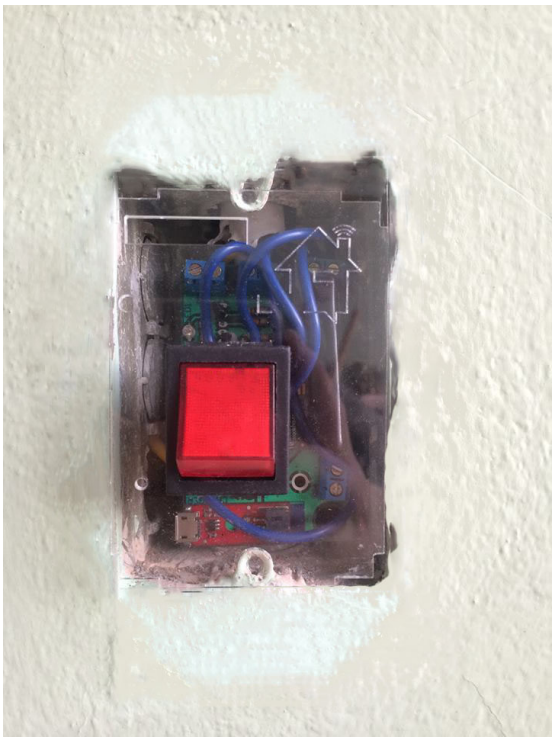


Figura 3.23: Actuador de Iluminación terminado e instalado. Fuente: Los Autores.

3.5.1. Pruebas de Conectividad Y Establecimiento de Red

Para estas pruebas se ubicaron los componentes del sistema un escenario tal que simule el entorno donde normalmente trabajara el sistema, tomando en cuenta los resultados de las pruebas de alcance de tal manera que el funcionamiento sea optimo.

Se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- El escenario es una vivienda de tres pisos.
- El servidor montado en Raspberry Pi está ubicado en el la planta baja y está conectado a la red local de la vivienda.
- El enrutador está alimentado en la parte central de la segunda planta.
- El actuador de iluminación está conectado en una habitación de la tercera planta, reemplazando un interruptor normal.

En este escenario los dispositivos se conectan sin linea de vista, además están separados por paredes de ladrillo y lozas entre pisos, el actuador de iluminación fue instalado y probado en una habitación de cada una de las plantas, teniendo una conexión optima en cada caso, tanto para el accionamiento manual como automático

3.5.2. Prueba de Administrador

La pagina de administración de dispositivos está escrita y desarrollada de la misma manera que la pagina de usuario, por lo cual el acceso se da sin ningún problema desde las mismas plataformas antes probadas con la pagina de usuario.

3.5.3. Prueba de Usuario

Las pruebas de acceso del usuario tanto en la red local como en la red externa, se realizaron en el mismo escenario, y desde diferentes sistemas operativos tanto para móviles como para ordenadores.

3.5.3.1. Plataformas

El sistema fue probado en las siguientes plataformas: Windows, Mac OS, iOS y Android. A continuación las capturas de la página web en cada una de las plataformas.

Figura 3.24: Pagina de Usuario desde Windows. Fuente: Los Autores.

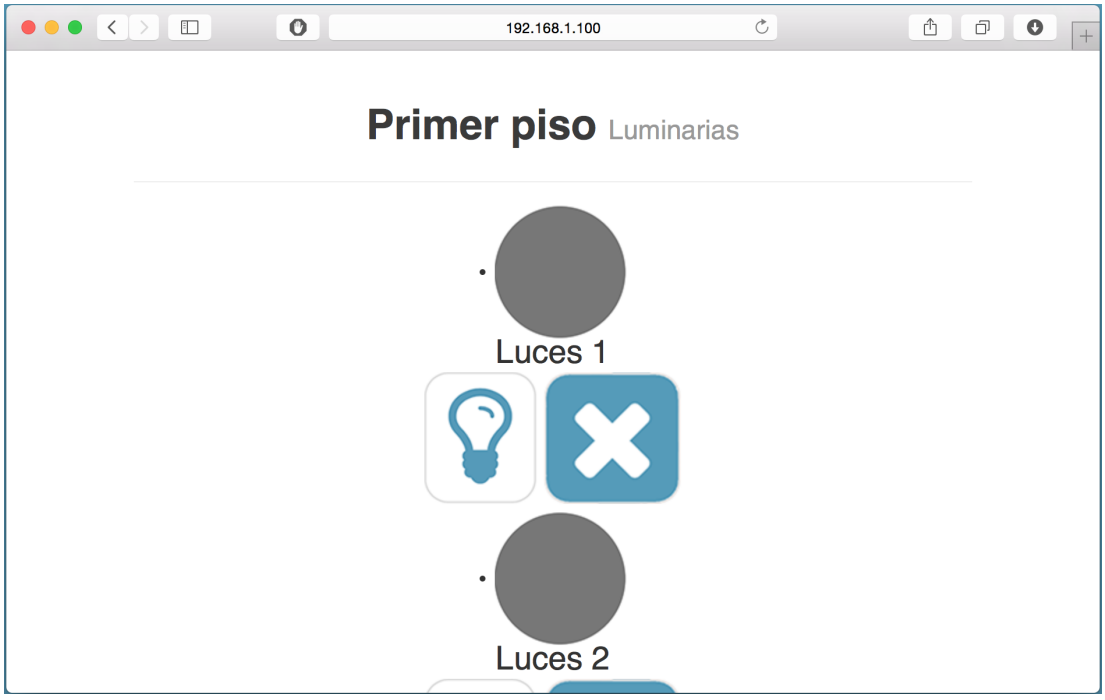


Figura 3.25: Pagina de Usuario desde Mac OS. Fuente: Los Autores.

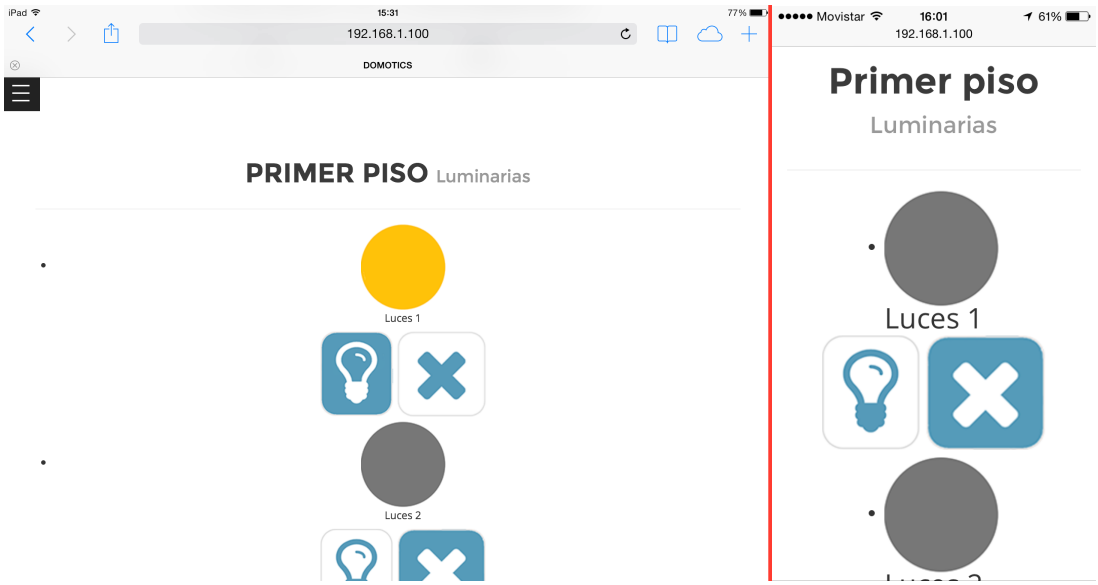


Figura 3.26: Izquierda: Pagina de Usuario desde iOS iPad. Derecha: Pagina de Usuario desde iOS iPhone. Fuente: Los Autores.

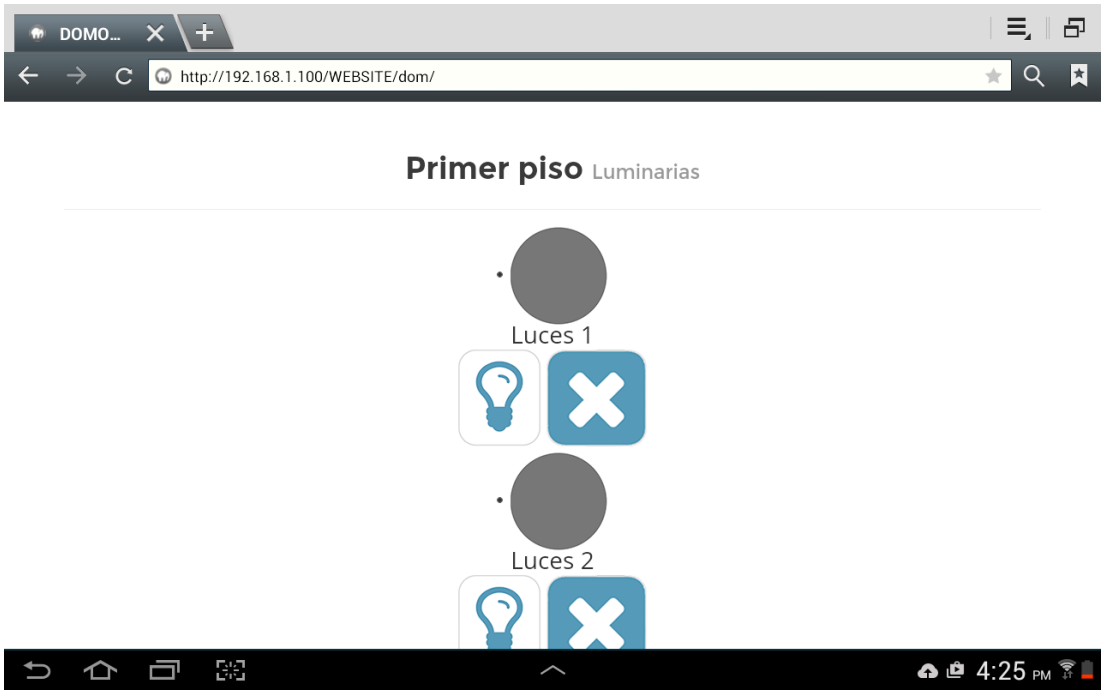


Figura 3.27: Pagina de Usuario desde Android. Fuente: Los Autores.

3.6. Estudio Financiero

El presente estudio financiero consiste en un análisis de costos y un estudio de rentabilidad, en base a estos dos se podrá ver la información que definirá si el proyecto es

rentable previo a su aplicación comercial; o en su defecto, que aspectos deberían ser modificados para que el proyecto sea rentable.

3.6.1. Detalle de Costos

Se divide en tres secciones: Materiales Directos, Mano de Obra y Activos Fijos.

3.6.1.1. Materiales Directos

Se presenta en detalle los materiales y los costes necesarios para la implementación domótica más simple en un sitio de instalación: un coordinador, un enrutador y un dispositivo final. Se obtiene que el costo total de los materiales directos es de $560.

Ítem	Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
1	Módulo Xbee Pro Series 2	3	35	105
2	Raspberry Pi	1	60	60
3	Batería	1	15	15
4	Relé de Estado Sólido	2	20	40
5	Carcasa Acrílico	3	20	60
6	Cable USB a Micro USB	2	5	10
7	Circuito Impreso	3	10	30
8	Componentes Electrónicos Varios	1	15	15
			SUBTOTAL	335
			IVA 12%	40,2
			TOTAL	**$375,20**

Cuadro 3.1: Materiales Directos por Sitio en el caso más simple. Fuente: Los Autores.

3.6.1.2. Mano de Obra

Se presenta en la siguiente tabla la mano de obra necesaria tanto para el desarrollo como para la instalación y producción del sistema de automatización. Se toma en cuenta tanto la mano de obra indirecta involucrada en el diseño, investigación y desarrollo del proyecto, como la mano de obra directa correspondiente a la construcción, instalación

y mantenimiento del sistema domótico planteado. Como se puede ver en la descripción de la mano de obra presentada en el Tabla 3.2 se tiene un precio total de $4345.

Ítem	Descripción	Titulo	Precio Unitario	Cantidad	Precio Total
1	Diseño e Investigación *	Ingeniero Electrónico	7	255	1785
2	Desarrollo de Software *	Ingeniero Electrónico	7	260	1820
3	Construcción	Ingeniero Electrónico	7	40	280
4	Pruebas	Ingeniero Electrónico	7	20	140
5	Programación del Sistema	Ingeniero Electrónico	7	40	280
6	Instalación y Mantenimiento	Técnico Electrónico	4	10	40
				SUBTOTAL	4345
				IVA 12%	0
* Mano de Obra Indirecta				TOTAL	**$4.345,00**

Cuadro 3.2: Costo de Mano de Obra. Fuente: Los Autores.

3.6.1.3. Activos Fijos

En la inversión por activos fijos para la producción del sistema domótico en cuestión se consideran los recursos tangibles involucrados tales como herramientas, equipos y adecuación de instalaciones. A continuación la descripción de los activos fijos y la depreciación de los mismos.

Ítem	Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total	Vida Útil	% Depreciación Anual	Valor Depreciación Anual	Valor Depreciación Mensual	Valor Depreciación por Instalación
Adecuación de Instalaciones									
1	Taller	1	300	300	10	20	60	5	0,2
2	Área Comercial	1	400	400	10	20	80	6,66666667	0,266666667
3	Área Administrativa	1	400	400	10	20	80	6,66666667	0,266666667
Equipos									
4	Computadora Portatil	1	800	800	3	33,33	266,64	22,22	0,8888
5	Impresora a Tinta	1	300	300	3	33,33	99,99	8,3325	0,3333
Herramientas									
6	Cautín	1	50	50	5	20	10	0,83333333	0,033333333
7	Explorador Xbee	1	40	40	5	20	8	0,66666667	0,026666667
8	Multimetro	1	50	50	5	20	10	0,83333333	0,033333333
9	Calibrador	1	20	20	10	10	2	0,16666667	0,006666667
10	Extensión	3	7	21	5	20	4,2	0,35	0,014
11	Herramientas Comunes	1	50	50	10	10	5	0,41666667	0,016666667
12	Taladro Multiusos	1	100	100	5	20	20	1,66666667	0,066666667
			TOTAL	**$2.531,00**			**$645,83**	**$53,82**	**2,152766667**

Cuadro 3.3: Activos Fijos. Fuente: Los Autores.

3.6.1.4. Costos de Implementación por Unidad

Los costos de implementación por unidad se obtienen utilizando los costos de producción, estos se describen a continuación.

Descripción	Valor Mensual Unidad	Valor Mensual
Mano de Obra Indirecta	35	1400
Mano de Obra Directa	18,5	740
Materiales	375,2	-
Servicios Básicos	10	400
Depreciación de Activos Fijos	2,152766667	-
Ganancia (30%)	132,25583	-
TOTAL	**$573,11**	

Cuadro 3.4: Costo de Instalación por Unidad. Fuente: Los Autores.

3.6.2. Estudio de Rentabilidad

En el presente estudio se utilizan los datos de costos obtenidos en la sección anterior, los cuales, se proyectan a cinco años. En base a las tasas de inflación anual proveídas por el banco central se realiza el cálculo desde el año 2015 hasta el 2019. Tomando en cuenta que la tendencia de inflación del año 2014 fue a la alza de alrededor de 0,36 % en el último trimestre se tiene la siguiente tabla de proyección de la tasa de inflación.

Tasa de Inflación	
Año	Tasa
2015	4,03
2016	4,39
2017	4,75
2018	5,11
2019	5,47

Cuadro 3.5: Tasa de Inflación Período 2015-2019. Fuente: Los Autores.

Una vez establecidas las tasas de inflación se puede realizar la proyección de costos para los siguientes cinco años respecto a ventas de sistemas domóticos.

Año	Sistemas	Precio de Venta al Público	Ventas Totales	Costos de Implementación Unitarios	Costo de Ventas	Gastos Administrativos	Gastos de Ventas
2015	240	$573,11	$137.546,06	$440,85	$105.804,66	$100,00	$10.800,00
2016	240	$596,20	$143.089,17	$458,62	$110.068,59	$104,03	$11.235,24
2017	240	$622,38	$149.370,78	$478,75	$114.900,60	$108,60	$11.728,47
2018	240	$651,94	$156.465,90	$501,49	$120.358,38	$113,76	$12.285,57
2019	240	$685,26	$164.461,30	$527,12	$126.508,70	$119,57	$12.913,36

Cuadro 3.6: Proyección de Gastos y Costos Período 2015-2019. Fuente: Los Autores.

Al tener establecidas las proyecciones se puede proceder a realizar el cálculo de rentabilidad en base a dos valores principalmente: VAN (Valor Actual Neto) y TIR (Tasa Interna de Retorno).

		2015	2016	2017	2018	2019
Ventas		$137.546,06	$143.089,17	$149.370,78	$156.465,90	$164.461,30
Costo de Producción		$105.804,66	$110.068,59	$114.900,60	$120.358,38	$126.508,70
Utilidad Bruta		**$31.741,40**	**$33.020,58**	**$34.470,18**	**$36.107,51**	**$37.952,61**
GASTOS OPERATIVOS (-)						
Gastos Administración		$100,00	$104,03	$108,60	$113,76	$119,57
Gastos Ventas		$10.800,00	$11.235,24	$11.728,47	$12.285,57	$12.913,36
Utilidad Operativa		**$20.841,40**	**$21.681,31**	**$22.633,12**	**$23.708,19**	**$24.919,68**
Gastos Financieros		$784,00	$784,00	$784,00	$784,00	$784,00
Utilidad Ejercicio		**$20.057,40**	**$20.897,31**	**$21.849,12**	**$22.924,19**	**$24.135,68**
Participación Empleados 15%		$3.008,61	$3.134,60	$3.277,37	$3.438,63	$3.620,35
Impuesto a la Renta 25%		$4.262,20	$4.440,68	$4.642,94	$4.871,39	$5.128,83
Utilidad Neta		**$12.786,59**	**$13.322,03**	**$13.928,81**	**$14.614,17**	**$15.386,50**
Adición de la Depreciación		$645,83	$645,83	$645,83	$645,83	$645,83
Pago de Préstamo		$2.000,00	$2.000,00	$2.000,00	$2.000,00	$2.000,00
Capital Inicial	-$10.000,00					
Monto de Préstamo	-$10.000,00					
Flujo de Efectivo Neto	**-$20.000,00**	**$11.432,42**	**$11.967,86**	**$12.574,64**	**$13.260,00**	**$14.032,33**
TMAR	**15%**					
VAN	**$21.816,70**					
TIR	**53,60%**					

Cuadro 3.7: Cálculo VAN y TIR para rentabilidad 2015-2019. Fuente: Los Autores.

El cálculo utilizando las proyecciones previamente analizadas entrega un valor de VAN de $21.816,70 el cual es un indicador de que la inversión inicial se recupera y que el proyecto es rentable, esto es comprobado por el valor de TIR de 53,6 % el cual es mayor al valor propuesto de TMAR de 15 %.

Un sistema básico tal como el considerado en el presente estudio financiero utilizando equipos de otras marcas refleja los siguientes precios provistos por la empresa Intellihome de la ciudad de Cuenca.

Ítem	Descripción	Marca	Protocolo	Precio
1	Interruptor	Zennio	KNX	185
2	Controlador 4 Canales	Zennio	KNX	425
3	Mini Servidor	Zennio	KNX	530
4	Fuente	Zennio	KNX	70
			TOTAL	**$1.210,00**

Cuadro 3.8: Precios de Sistemas Domóticos con Protocolo KNX. Fuente: Los Autores.

Ítem	Descripción	Marca	Protocolo	Precio
1	Interruptor	-	-	2
2	Mini Servidor 8 Canales	Loxon	RS-485	902
3	Fuente	Loxon	RS-485	60
			TOTAL	**$964,00**

Cuadro 3.9: Precios de Sistemas Domóticos con Protocolo RS-487. Fuente: Los Autores.

En los precios anteriores no se consideran los costos de instalación debido que son variables por el hecho de ser sistemas cableados. Como se puede notar, la solución de automatización provista en el presente documento resulta más económica que las opciones presentes en la ciudad y tiene la ventaja de ser inalámbrica; lo cual disminuye los costos de instalación, lo que representa una gran oportunidad de negocio al menos a nivel local.

Capítulo 4

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

- Durante el desarrollo del presente trabajo de tesis se pudo notar la importancia de la utilización de un protocolo como ZigBee para aplicaciones de domótica debido a que al tener una baja tasa de datos no exige mayor consumo de energía para funcionar, presenta largos períodos de duración de las baterías para los módulos actuadores. Sin embargo dependiendo de la programación a la que se le someta y el tipo de módulos XBee que se utilicen se puede tener más eficiencia de batería usando módulos menos complejos que los XBee Pro Series 2, sacrificando algunas funciones; de igual manera, al utilizar módulos más complejos como los XBee Pro S2B se tiene más funciones sacrificando la duración de las baterías. Por lo estipulado anteriormente se puede concluir que para un desarrollo de actuadores domóticos que permita mejoras en los mismos el módulo más indicado es el XBee Pro Series 2.

- Al utilizar en el desarrollo de la tesis herramientas Open Source y Open Hardware se tiene que los costos de implementación y desarrollo disminuyen notablemente, con el único particular que se debe entregar libremente la documentación

utilizada para así retribuir el conocimiento adquirido.

- Una vez concluidas las pruebas del sistema se obtuvo que la implementación es posible en todo tipo de domicilio actual ya que sin importar el material y grosor de los pisos y paredes, la red probó ser muy estable y confiable bajo condiciones de el peor escenario posible como es: varias paredes entre módulos, varios pisos entre módulos, gran número de obstáculos, colocación no óptima de los módulos, etc. Resulta muy útil la inclusión de enrutadores para expansión y mejorar la estabilidad de la red ZigBee ya que no requiere mayor instalación que conectarlo a un puerto USB estándar de computadora o un cargador que recepte el terminal USB macho de dicho módulo. Al utilizar el mismo criterio de peor escenario posible en el diseño se puede asegurar que el sistema a pesar de no tener energía o conexión se puede operar como un interruptor común y corriente previniendo que en caso de fallo el usuario no pueda accionar las luminarias.

- El actuador de iluminación al ser inalámbrico y poseer una fuente de alimentación propia no requiere de elementos adicionales para su instalación y configuración, permitiendo una solución de bajo costo y fácilmente adaptable a la infraestructura de cualquier tipo de vivienda o edificio. Se observó que la seguridad que provee el protocolo Zigbee en la red es muy robusta, por lo que el sistema muestra una confiabilidad e integridad en la transmisión de datos entre los dispositivos que lo conforman; esto, sumado a la seguridad del servidor web para el acceso de usuario y manejo de la base de datos, hacen del sistema que sea poco propenso a intrusiones externas. La topología tipo malla del protocolo Zigbee usada hace que el sistema sea redundante, es decir si la conexión se pierde por una ruta, siempre va encontrar una nueva ruta a través de los dispositivos que conforman la red, además permite una gran escalabilidad en el crecimiento de la red, tanto en el numero de dispositivos como en las distancias de alcance.

- El Raspberry Pi usado para el servidor web y base de datos usa muy pocos recur-

sos de su capacidad total para el trabajo que esta realizando, por lo que permite muchas mas opciones de mejora, algunas de ellas son expuestas en las recomendaciones. El entorno web del sistema demostró gran adaptación a los diferentes tipos de sistemas operativos y dispositivos existentes, tanto en funcionalidad como en diseño, además de ser muy intuitivo y fácil de usar, consideración muy importante para el consumidor.

- Uno de los objetivos fue lograr que el sistema sea de simple conexión y uso (plug and play), lo cual fue posible mediante la pagina de administración y el script desarrollado en Python que maneja el Raspberry Pi, de esta manera no se necesita ningún código adicional para agregar nuevos dispositivos. El uso de Python como lenguaje de programación para la interface entre la red Zigbee y la pagina web hizo que su adaptación sea optima, además es un lenguaje fácil de entender y codificar principalmente en el uso de scripts que son ejecutados nativamente en el Raspberry Pi.

- Los módulos Xbee usados, cuentan con una gran variedad de documentación y herramientas para su configuración, lo cual fue muy útil a lo largo del diseño y desarrollo del sistema. El presente documento mostró el desarrollo de un prototipo de un actuador de iluminación usando el protocolo Zigbee, el cual sirve como base para el diseño de otros tipos de actuadores que funcionen dentro del mismo sistema. Ya que al estar demostrado el funcionamiento de ésta red y sus ventajas de uso, así como también su fácil implementación provee una visión general para el futuro desarrollo de los mismos.

Recomendaciones

- Tomando en cuenta las pruebas realizadas y los cálculos de rendimiento, es recomendable usar un modulo Xbee de una gama baja de este modo el consumo de

energía se reduce considerablemente, lo que implica una batería de menor capacidad y mas pequeña, esto hace que los costos se reduzcan , algo muy importante al ser el sistema una solución domótica de bajo costo.

- Si se desea abaratar aun mas los costos del actuador de iluminación, se pueden usar relés electromecánicos en lugar de los de estado solido, con los cuales se obtiene la misma eficiencia, pero un sistema ruidoso, lo cual muchas veces causa molestias en el consumidor.

- El coordinador y el enrutador deben estar ubicados en la parte mas central del lugar en donde van a ser instalados, también se recomienda instalar un enrutador en cada piso o sección, de esta manera se garantiza la conexión con todos los dispositivos finales ubicados en la misma planta.

- En la configuración del dispositivo final, se debe escoger cuidadosamente el tiempo en el que el modulo estará dormido, ya que si el tiempo es muy largo, el sistema se vuelve ineficiente, y si es muy corto la duración de la batería se reduce drásticamente.

- El cálculo de la duración de la batería es aproximado, por lo que la misma debe ser cargada apenas se encienda el LED indicador de batería baja en el actuador de iluminación, de este modo no se pierde la eficiencia del sistema.

- La base de datos puede ser usada para almacenar información acerca de el tiempo de encendido de las luminarias, de esta manera se podría llevar un registro del consumo de energía.

- El sistema presenta un gran potencial con respecto a mejoras, partiendo del Raspberry Pi, este puede ser convertido en una central, por medio de una pantalla táctil, en la que se podrían controlar los actuadores de iluminación, además sus salidas de audio permiten la reproducción de música o anuncios desde la misma central.

- Con respecto a seguridad, el Raspberry Pi podría ser usado para el acceso con clave, por medio de un teclado, o incluso por reconocimiento facial, todo esto sin necesidad de hardware complejo, solamente serian necesarios un teclado y una simple cámara web que irían conectados directamente al Raspberry Pi.

- El servidor montado en Raspberry Pi, puede ser usado para un sin numero de aplicaciones dentro de la red local tales como un servidor DNLA (Digital Living Network Alliance), el cual permite compartir contenido multimedia entre dispositivos dentro de la red local, tales como móviles, computadores, Televisiones inteligentes, de esta manera se tendría un sistema multimedia centralizado en donde todo el contenido estará almacenado en el Raspberry Pi y puede ser reproducido por cualquier dispositivo.

Bibliografía

[Raspberry Foundation, 2013] Raspberry Pi Foundation. (2013). *Raspberry Pi Model B Documentation.* Julio 21, 2014, de Raspberry Pi Foundation. Sitio web: http://www.raspberrypi.org/documentation/setup/-README.md

[ZigBee Alliance, 2010] ZigBee Alliance. (2010). *ZigBee Specification 053520r26.* Julio 25, 2014, de ZigBee Alliance. Sitio web: https://docs.zigbee.org/zigbee-docs/dcn/07/docs-07-5367-02-0afg-home-automation-profile-for-public-download.pdf

[IEEE, 2006] IEEE. (2006). *IEEE 802.15.4 Wireless Medium Access Control and Physical Layer Specifications for Low –Rate Wireless Personal Area Networks.* Julio 20, 2014, de IEEE. Sitio web: ieeexplore.ieee.org/ielD/4040997/4040998/04040999.pdf

[Digi International Inc., 2014] Digi International Inc. (2014). *XBee®/XBee-PRO® ZB RF Modules.* Agosto 11, 2014, de Digi International Inc. Sitio web: http://ftp1.digi.com/support/documentation/90000-976_S.pdf

[Elinux, 2012] Elinux (febrero 12, 2012). *RPiconfig.* Octubre 18, 2014, de raspbian.org. Sitio web: http://elinux.org/RPiconfig

[Anders, 2011] Michel Anders. (mayo, 2011). *Python 3 Web Development Beginner's Guide.* Septiembre 15, 2014, de Phyton Software Foundation. Sitio web: http://www.packtpub.com/python-3-web-development-beginners-guide/book

[Digi International Inc., 2013] Digi International Inc. (2013). *XBee Getting Started Guide.* Octubre 5, 2014, de Smith College. Sitio web: http://www.science.smith.edu/~jcardell/Courses/E-GR328/Readings/XbeeGettingStarted.pdf

[Bitlloch, 2008] P Bitlloch Font. (2008). *X-CTU Configuration & Test Utility Software User Guide.* Octubre 10, 2014, de Digi International Inc. Sitio web: http://ftp1.digi.com/support/documentation/90001-003_A.pdf

[Finlinson, 2005] Jan Finlinson. (2005). *Battery Life Calculator.* Noviembre 5, 2014, de MaxStream Inc. Sitio web: http://ftp1.digi.com/support/utilities/batterylifecalculator.xls

[Lim, 2011] Seong Peng Lim, Gik Hong Yeap. (2011). *Centralised Smart Home Control System via XBee Transceivers.* Diciembre 6, 2011, de Humanities, Science and Engineering (CHUSER), 2011 IEEE Colloquium on , vol., no., pp.327,330, 5-6 Dec. 2011. Sitio web:

http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6163743&isnumber=6163686

[Li, 2012] Hui Li, Hao Zhang, Daogang Peng, Liang Zhang. (2012). *Family network automation system based on ZigBee.* Junio 28, 2012, de World Automation Congress (WAC), 2012 , vol., no., pp.1,4, 24-28 June 2012. Sitio web: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6321611&isnumber=6320876

[Jain, 2014] Sarthak Jain, Anant Vaibhav, Lovely Goyal. (2014). *Raspberry Pi based interactive home automation system through E-mail.* Febrero 8, 2014, de Optimization, Reliabilty, and Information Technology (ICROIT), 2014 International Conference on , vol., no., pp.277,280, 6-8 Feb. 2014. Sitio web: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6798330&isnumber=6798279

[Nanda, 2012] Kaushik Nanda, Kiran Nayak, Shrikrishna Chippalkatti, Ramana Rao, David Selvakumar, Haribabu Pasupuleti. (2012). *Web based monitoring and control of WSN using WINGZ (Wireless IP network gateway for Zigbee).* Diciembre, 2012, de Sensing Technology (ICST), 2012 Sixth International Conference on , vol., no., pp.666,671, 18-21 Dec. 2012. Sitio web: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6461761&isnumber=6461638

[Bunyai, 2012] Dominik Bunyai, Lukas Krammer, Wolfgang Kastner. (2012). *Limiting constraints for ZigBee networks.* Octubre 28, 2012, de IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society , vol., no., pp.4840,4846, 25-28 Oct. 2012. Sitio Web: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6389582&isnumber=6388505

[Batista, 2012] N. C. Batista, R. Melício, J. C. O. Matias, J. P. S. Catalão. (2012). *ZigBee wireless area network for home automation and energy management: Field trials and installation approaches.* Octubre 17, 2012, de Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), 2012 3rd IEEE PES International Conference and Exhibition on , vol., no., pp.1,5, 14-17 Oct. 2012. Sitio web: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6465691&isnumber=6465601

[Rathod, 2012] Kartik Rathod, Nilay Parikh, Aesha Parikh, Vrushank Shah. (2012). *Wireless automation using ZigBee protocols.* Septiembre 22, 2012, de Wireless and Optical Communications Networks (WOCN), 2012 Ninth International Conference on , vol., no., pp.1,5, 20-22 Sept. 2012. Sitio web: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6335517&isnumber=6331881

[Domínguez, 2012] Federico Domínguez, Abdellah Touhafi, Jelmer Tiete, Muzaffer Güler, Kris Steenhaut. (2012). *Migration from a legacy wireless technology to*

ZigBee for a Home Automation market ready system. Junio 14, 2012, de Networked Sensing Systems (INSS), 2012 Ninth International Conference on , vol., no., pp.1,4, 11-14 June 2012. Sitio web: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6240541&isnumber=6240517

[Olteanu, 2013] Alexandru-Corneliu Olteanu, George-Daniel Oprina, Nicolae Tapus, Sven Zeisberg. (2013). *Enabling Mobile Devices for Home Automation Using ZigBee.* Mayo 31, 2013, de Control Systems and Computer Science (CSCS), 2013 19th International Conference on , vol., no., pp.189,195, 29-31 May 2013. Sitio Web: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6569264&isnumber=6569227

[Hsiao, 2012] R. S. Hsiao, D. B. Lin, H. P. Lin, C. H. Chung and S. C. Cheng. (2012). *Integrating ZigBee lighting control into existing building automation systems.* Diciembre 9, 2012, de Information Science and Control Engineering 2012 (ICISCE 2012), IET International Conference on , vol., no., pp.1,5, 7-9 Dec. 2012. Sitio web: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6755824&isnumber=6755634

[Garzón, 2010] Cecilia Garzón. (2010). *Análisis y estudio de impacto de la tecnología ZIGBEE aplicado a la domótica en el Ecuador.* Octubre, 2010, de Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito. Sitio web: http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/4395

[Fierro, 2012] Ángel Fierro, José Lapo. (2012). *Diseño, construcción e implementación de un prototipo de sistema de control domótico supervisado y no supervisado usando la tecnología GSM y ZIGBEE, para la empresa Soft Teratronic.* Junio, 2012, de Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito. Sitio web: http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/3698

[Cedeño, 2010] Miguel Cedeño, Carlos Eras. (2010). *Diseño, implementación y monitoreo de una red Mesh/Zigbee aplicado a la domótica, gestionada mediante SMS (Short Message Service), servidor web, correo electrónico, aplicación bluetooth para dispositivos móviles y control inalámbrico local.* Noviembre, 2010, de Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito. Sitio web: http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/4383

Capítulo 5

Anexos

Especificaciones Generales Módulos XBee Series 2

Descripción	Raspberry Modelo B
Rango Indoor y Rango Urbano	Más de 90m. Indoor y más de 60m. en Urbano
Rango Outdoor Línea de Vista	Más de 3200m
Potencia de Transmisión	63mW(+18dBm)
Tasa de Datos de RF	250Mbps
Rendimiento de Datos	Más de 35Mbps
Tasa de Datos Interface Serial	1.2Mbps - 1Mbps (Seleccionable)
Sensibilidad del Receptor	-102dBm
Voltaje de Alimentación	2.7V - 3.6V
Corriente de Transmisión, Máxima potencia de Salida	205mA - 220mA con variable programable, 117mA -132mA con variable programable
Corriente de Recepción	47mA - 62mA con variable programable.
Corriente de Reposo	15mA
Corriente de Apagado	3.5uA a 25˚C
Banda de Frecuencia	ISM 2.4GHz
Dimensiones	2.438cm x 3.294cm
Temperatura de Operación	-40 a 85˚C
Opciones de Antena	Antena de Lazo Integrada, Antena Embebida en PCB, RPSMA o conector U.FL.
Interfaz I/O	3.3V CMOS UART, DIO, ADC.
Topologías de Red Soportadas	Punto a punto, multipunto, peer to peer y malla
Número de Canales	15 canales de secuencia directa del 11 al 15
Opciones de Direccionamiento	PAN ID y direcciones, ID de cluster y puntos finales

Características XBee Pro Series 2. Fuente: Digi International Inc.

Simb	Parámetro	Condición	Min	Max	Und
V_{IL}	Voltaje de Ingreso Bajo	Todas las Entradas Digitales	-	0.2*VCC	V
V_{IH}	Voltaje de Ingreso Alto	Todas las Entradas Digitales	0.8*VCC	-	V
V_{OL}	Voltaje de Salida Bajo	VCC >= 2.7 V	-	0.18*VCC	V
V_{OH}	Voltaje de Salida Alto	VCC >= 2.7 V	0.82*VCC	-	V
I_{IIN}	Corriente de Fuga de Ingreso	VIN= VCC o GND, todas las entradas	-	0.5	uA
I_{OHS}	Corriente de Salida de Fuente (estándar)	Todas las salidas digitales excepto RSSI/PWM, DIO10, DIO4		4	mA
I_{OHH}	Corriente de Salida de Fuente (alta)	Salidas Digitales RSSI/PWM, DIO10, DIO4		8	mA
I_{OLS}	Corriente Absorbida de Salida (estándar)	Todas las entradas digitales excepto RSSI/PWM, DIO10, DIO4		4	mA
I_{OLH}	Corriente Absorbida de Salida (alta)	Entradas Digitales RSSI/PWM, DIO10, DIO4		8	mA
$I_{OH} + I_{OL}$	Corriente Total de Salida para todos los pines E/S	Todas las salidas digitales		40	mA
V_{REFI}	Voltaje Referencia Interno	EM250 con referencia fija	1.19	1.21	V
V_{IADC}	Rango de Voltaje de Ingreso	-	0	VREFI	V
R_{IS}	Impedancia de Ingreso (Muestreo)	Mientras se toma una muestra	1		MΩ
R_I	Impedancia de Ingreso	Mientras no se toma una muestra	10		MΩ

Características Eléctricas de XBee Pro Series 2. Fuente: Digi International Inc.

Pin	Nombre	Dirección	Estado por Defecto	Descripción
1	VCC	-	-	Alimentación
2	DOUT	Salida	Salida	Salida Datos UART
3	DIN/CONFIG	Entrada	Entrada	Entrada Datos UART
4	DIO12	Ambos	Deshabitado	E/S Digital 12
5	RESET	Ambos	Colector Abierto	Reinicio de Módulo
6	RSSI PWM/DIO10	Ambos	Salida	Indicador de Fuerza de Señal Rx / E/S Digital 10
7	DIO11	Ambos	Entrada	E/S Digital 11
8	[reservado]	-	Deshabilitado	No Conectar
9	SLEEP_RQ/ DIO8	Ambos	Entrada	Control Suspensión o E/S Digital 8
10	GND	-	-	Tierra
11	DIO4	Ambos	Deshabilitado	E/S Digital 4
12	CTS/DIO7	Ambos	Salida	Control de Flujo de Datos o E/S Digital 7
13	ON/SLEEP	Salida	Salida	Indicador de Estado o E/S Digital 9
14	VREF	Entrada	-	Conexión de compatibilidad módulos XBee
15	Asociado/DIO5	Ambos	Salida	Indicador Asociado / E/S Digital 5
16	RTS/DIO6	Ambos	Entrada	Control de Solicitud de flujo / E/S Digital 6
17	AD3/DIO3	Ambos	Deshabilitado	Entrada Analógica 3 / E/S Digital 3
18	AD2/DIO2	Ambos	Deshabilitado	Entrada Analógica 2 / E/S Digital 2
19	AD1/DIO1	Ambos	Deshabilitado	Entrada Analógica 1 / E/S Digital 1
20	AD0/DIO0	Ambos	Deshabilitado	Entrada Analógica 0 / E/S Digital 0

Asignación de Pines de XBee Pro Series 2. Fuente: Digi International Inc.

Scripts de Python

```
#!/usr/bin/python
import serial
import time
import MySQLdb as mdb
from xbee import ZigBee
from xbee import XBee
ser=ser = serial.Serial('/dev/ttyAMA0', 115200)
xbee=ZigBee(ser)
PORT='/dev/ttyAMA0'
BAUD_RATE=115200
ser = serial.Serial(PORT, BAUD_RATE)
xbee=ZigBee(ser)
add = '\x00\x13\xa2\x00\x40\x2C\x75\xBC'
while True:
    response = xbee.wait_read_frame()
    try:
        res = response["samples"]
        r=res[0]
            d1=r["dio-1"]
            d2=r["dio-2"]
            d4=r["dio-4"]
        con = mdb.connect('localhost', 'root', 'root', 'pihome');

        with con:

            cur = con.cursor(mdb.cursors.DictCursor)
            cur.execute("SELECT * FROM pi_devices")

            rows = cur.fetchall()
            r= rows[0]
            ro=r["status"]
            print ro
        if ro=="0":

            if d1 == True and d4 == False:
                xbee.remote_at(dest_addr_long=add,command='D4',parameter='\x05')
            elif d1==False and d2==True:
                xbee.remote_at(dest_addr_long=add,command='D2',parameter='\x04')
            con = mdb.connect('localhost', 'root', 'root', 'pihome');

            with con:

                cur = con.cursor()
                cur.execute("UPDATE pi_devices SET status = %s WHERE id = %s",("1", "1"))
        if ro=="1":
            if d1==True and d4==True:
                xbee.remote_at(dest_addr_long=add,command='D4',parameter='\x04')
            elif d1==False and d2==False:
                xbee.remote_at(dest_addr_long=add,command='D2',parameter='\x05')
            con = mdb.connect('localhost', 'root', 'root', 'pihome');
                        with con:

                            cur = con.cursor()
                            cur.execute("UPDATE pi_devices SET status = %s WHERE id = %s",("0", "1"))
    except KeyError:
        print "parameter"
    try:
        res = response["parameter"]
    except KeyError:
        print "samples"
ser.close()
```

```
#!/usr/bin/python
from BaseHTTPServer import BaseHTTPRequestHandler,HTTPServer
import time
import cgi,string,datetime
import serial
import binascii
from os import curdir, sep, path
import serial
from xbee import ZigBee
from xbee import XBee
PORT_NUMBER = 8888

class myHandler(BaseHTTPRequestHandler):
    def do_GET(self):
        self.send_response(200)
        self.send_header('Content-type','text/html')
        self.end_headers()
        datastring = str(self.path).split("request/")[1]
                letter = datastring.split("/")[0]
                letter = string.upper(letter)
                status = datastring.split("/")[1]
                status = string.lower(status)
                code = datastring.split("/")[2]
        self.wfile.write(datastring)
        print letter
        print status
        PORT='/dev/ttyAMA0'
        BAUD_RATE=115200
        ser = serial.Serial(PORT, BAUD_RATE)
        xbee=ZigBee(ser)
        add = '\x00\x13\xa2\x00\x40\x2C\x75\xBC'

        if letter == "A":
            if status == "on":

                xbee.remote_at(dest_addr_long=add,command='D2',parameter='\x04')
                xbee.remote_at(dest_addr_long=add,command='D4',parameter='\x05')
                xbee.remote_at(dest_addr_long=add,command='IS',frame_id='A')

            elif status == "off":

                xbee.remote_at(dest_addr_long=add,command='D2', parameter='\x05')
                xbee.remote_at(dest_addr_long=add,command='D4', parameter='\x04')
                xbee.remote_at(dest_addr_long=add,command='IS',frame_id='A')
                ser.close()
        return

try:
    server = HTTPServer(('', PORT_NUMBER), myHandler)
    print 'Started httpserver on port ' , PORT_NUMBER

    server.serve_forever()

except KeyboardInterrupt:
    print '^C received, shutting down the web server'
    server.socket.close()
```