



**TECNOLÓGICO
DE MONTERREY®**

**Instituto Tecnológico y de Estudios
Superiores de Monterrey
Campus Ciudad de México**

División de Ingeniería y Arquitectura
Departamento de Ingeniería Mecatrónica
Ingeniería en Mecatrónica

**Sistema de monitoreo industrial utilizando
tecnología ZigBee®**

Autores:

Ignacio Narvárez Alavez
Fernanda P. Galicia Ocampo
Daniel Chaparro Altamirano



Asesor:

Dr. Raúl Crespo Saucedo

México D.F.

Diciembre de 2010

Índice

1. Introducción.....	3
1.1 Antecedentes.....	3
1.2 Problemática.....	3
1.3 Objetivos Generales.....	4
1.4 Objetivos Específicos.....	4
1.5 Justificación.....	4
1.6 Alcances.....	5
2. Marco teórico.....	6
2.1 Estado del Arte.....	7
2.2 Protocolos de comunicación inalámbrica.....	8
2.3 Tipos de redes.....	14
2.4 ZigBee®.....	15
2.5 Ejemplos relevantes del uso de la tecnología ZigBee®.....	17
3. Desarrollo del Proyecto.....	22
3.1 Descripción del sistema.....	23
3.2 Selección del equipo.....	24
3.3 Sensores.....	31
3.4 Detalles de instrumentación.....	34
3.5 Conexión a Internet.....	34
3.6 Sitio Web.....	35
4. Pruebas y resultados.....	42
4.1 Prueba de la red.....	42
4.2 Prueba de los sensores.....	49
4.3 Prueba en la industria.....	50
4.4 Análisis energético.....	54
5. Conclusiones y trabajo a futuro.....	62
6. Bibliografía.....	64

Capítulo 1

Introducción

1.1 Antecedentes

Francisco Javier Dávila es un ex-alumno del Tecnológico de Monterrey quien estudió una maestría en Suecia, en la Universidad de Jönköping, realizó su tesis de maestría sobre un protocolo de RFID activo que es energéticamente eficiente. Javier comenzó a trabajar en una empresa sueca llamada CombiQ AB, la cual se especializa en implementar soluciones a problemas mediante el uso de RFID, especialmente en las áreas de seguridad y logística. Dentro de esta empresa surgió la idea de desarrollar una red de sensores inalámbricos para aplicarla en diversas áreas, pero enfocándose al ahorro de energía por parte de los sensores. Javier se puso en contacto con el Tecnológico de Monterrey y comenzó este proyecto, sin embargo se tuvieron ciertos inconvenientes, por lo que se decidió realizar un proyecto similar pero por nuestra cuenta y utilizando un hardware distinto.

Por otra parte nuestro equipo está conformado por tres ingenieros mecánicos y en nuestro plan de estudios no tenemos ninguna materia relacionada con algún tipo de comunicación inalámbrica, por lo que elegir este proyecto nos pareció una gran oportunidad para aprender sobre ciertos temas que no nos enseñan en la escuela y sin embargo nos pueden ser muy importantes como profesionistas ya que los podemos aplicar en las áreas en las que nos especializamos.

1.2 Problemática

Actualmente las industrias tienen altos costos de consumo eléctrico y las irregularidades en el suministro de energía provocan interrupciones en el proceso productivo que implica pérdidas muy altas cada vez que se presentan. Un gran número de empresas no cuenta con un sistema de monitoreo de sus máquinas y tomando en cuenta las condiciones extremas de trabajo es evidente que en ocasiones se propicia la pérdida de un elemento de trabajo, siendo que pudo haberse evitado el paro de la producción y una alta pérdida de dinero. Esta ausencia

de vigilancia genera respuestas tardías por parte de los equipos de mantenimiento, incrementando la gravedad de este problema.

1.3 Objetivos Generales

Generar una red sensorial inalámbrica 802.15.4 que sea capaz de medir la corriente consumida por un motor, la temperatura del mismo y mandar esa información a una base de datos en internet.

1.4 Objetivos Específicos

- Realizar pruebas de alcance y de distintas topologías de red para comprobar la efectividad de cada una y poder elegir la más conveniente.
- Crear una comunicación entre los nodos y el coordinador central.
- Integrar sensores de temperatura y corriente a los nodos.
- Diseñar una interfaz de prueba para comprobar el funcionamiento de la red de nodos. En este aspecto no se considerará un diseño atractivo para el usuario sino un prototipo funcional.
- Generar una base de datos a la que se envíen los datos adquiridos por los sensores a través de internet.
- Diseñar un sitio web que interactúe con la base de datos y que sirva para la consulta de la información.
- Integrar la base de datos con el sistema de sensores.
- Integrar todas las partes en un sistema que despliegue gráficas, alertas y tablas dependiendo de las mediciones de la red de sensores.
- Comprobar el funcionamiento adecuado de los sensores y calibrarlos para establecer condiciones confiables de operación.

1.5 Justificación

Este sistema permite el monitoreo del equipo industrial sin la necesidad de instalar una estructura de cableado por lo que se aumenta la flexibilidad y se reducen costos al momento de la ubicación en la planta. Debido a la conexión entre el sistema y la

base de datos a través de la red se provee de movilidad al usuario puesto que el monitoreo puede realizarse a través del sitio web y se descarta la necesidad de destinar un equipo de cómputo exclusivamente a esta labor.

Con la información obtenida constantemente es posible predecir cuándo es necesario realizar mantenimiento de forma que éste sea preventivo y no correctivo. Se conoce constantemente el estado en el que se encuentra el equipo de la planta sin ser necesaria la presencia de un operador que esté pendiente todo el tiempo.

1.6 Alcances

Este proyecto tendrá los siguientes alcances:

- Crear una conexión entre los nodos sensoriales con el fin de transmitir información.
- Diseño de un sitio web sencillo para monitorear las variables medidas por los nodos sensoriales.
- Desarrollar un sistema robusto que pueda funcionar en un ambiente industrial.

Este proyecto no contempla las siguientes actividades:

- Desarrollo de una interfaz gráfica llamativa.
- Diseño y construcción de nodos sensoriales.
- Diseño y construcción de los sensores.
- Diseño y construcción de una carcasa estéticamente agradable para cubrir los nodos sensoriales.

Capítulo 2

Marco teórico

En los últimos años, las tecnologías de red inalámbricas han tenido un gran auge en la sociedad. Mientras que las redes cableadas tienen ciertas ventajas, las redes inalámbricas soportan instalaciones de bajo costo y esfuerzo de instalación, portabilidad de los dispositivos de la red y movilidad de los usuarios de la red. Por estas y otras razones la aplicación de las redes inalámbricas ha ido creciendo.

Las redes inalámbricas se pueden categorizar dependiendo de su aplicación, velocidad y área de cobertura como se observa en la tabla 2.1, sin embargo hay que mencionar que la tabla no es del todo cierta, es decir pueden existir ciertas redes de una categoría que no necesariamente cumplan todas las características. Por otra parte el transmisor inalámbrico en general se hace la suposición de que manda ondas de radio, pero pueden usarse otras tecnologías como la luz infrarroja.

Tipo de Red	Velocidad de transmisión	Área de cobertura	Aplicaciones típicas	Ejemplos de Tecnologías
WWAN	<10 Mbps	>10 km	Telefonía, Internet móvil	GSM, UMTS, satélite
WMAN	<100 Mbps	<10 km	Internet de banda ancha	IEEE 802.16, HIPERMAN
WLAN	<100 Mbps	<100 m	Reemplazo de redes LAN alámbricas	IEEE 802.11, HIPERLAN/2
WPAN	<10 Mbps	<10 m	Transferencia de datos personales	Bluetooth, IEEE 802.15.3
WSN	<1Mbps	<1 km	Monitoreo y control	IEEE 802.15.4, RFID

Tabla 2.1 Una clasificación de las tecnologías de comunicación inalámbricas [1].

Las redes inalámbricas de área local (WLAN) hoy en día se utilizan principalmente para dar acceso a la red dentro de edificios y casas y se basan en el estándar IEEE 802.11. Por otro lado las redes inalámbricas de área personal (WPAN) por lo general se utilizan para comunicar dispositivos personales como los asistentes digitales personales (PDA), teléfonos móviles o audífonos, se utilizan

también en aplicaciones de baja velocidad y bajo consumo energético, como en sistemas de alarma o automatización. Las redes sensoriales inalámbricas (WSN) es una clase emergente con gran auge tanto en la industria como en la investigación académica. Las WSN consisten en nodos independientes que sensan información y/o realizan una acción y que colaboran entre todos.

A diferencia de las WPAN y WLAN, las WSN no se encuentran clasificadas en una categoría por su alcance o velocidad, sino más bien por el hecho de que las WSN se organizan automáticamente y están orientadas a una aplicación específica y por esa razón la cobertura de estas redes puede variar desde algunos metros, hasta kilómetros [2].

2.1 Estado del Arte

Los mayores problemas y retos que ha enfrentado la humanidad a lo largo de su historia han requerido de soluciones de igual magnitud. Tomemos en consideración la problemática de cruzar el atlántico durante un viaje entre Europa y América. Durante siglos la única forma de hacer esto fue por medio de barcos que tardaban varios meses en lograrlo. Posteriormente se hizo un avance en la forma de propulsión de las naves y se logró disminuir este tiempo a unas semanas. Sin embargo, el cambio radical en este tema se generó hasta la invención del avión en el siglo XIX. A sus comienzos esta tecnología sorprendió a muchos pero se consideraba imposible cruzar un océano a bordo de una aeronave. Los esfuerzos e intentos no pararon, hasta que en 1919 se logró el primer vuelo de este tipo con una duración de 53 horas. Actualmente vivimos sabiendo que es posible volar entre América y Europa en unas cuantas horas [3].

Tomemos ahora un ejemplo que relaciona lo anterior con este proyecto. El uso del automóvil es para muchos de nosotros una necesidad, sin embargo, las desventajas de este medio de transporte son muchas. El alto costo de los combustibles, el tiempo perdido en los congestionamientos y el peligro de accidentes son factores que preocupan a cualquier persona dependiente del automóvil como medio de transporte.

Con el desarrollo de la tecnología actual es posible desarrollar un sistema de transporte automatizado basado en el mismo automóvil que conocemos actualmente. Imaginemos a cada auto como un nodo dentro de una red inmensa. Cada uno de estos, tendrá la capacidad de comunicarse con sus semejantes cercanos a él. Esta comunicación permitirá compartir datos como velocidad, posición, destino, etc. De esta manera, y con la ayuda de una red de control central se podría prescindir de la acción humana para el manejo del vehículo. Así, podría reducirse enormemente el factor de peligro de accidentes pues los errores humanos son la mayor causa de estos.

La tecnología inalámbrica está resolviendo problemáticas como la falta de espacio, confiabilidad, organización estructural, gastos de instalación y mantenimiento, accesibilidad, etc. En sus inicios la radio revolucionó a los medios de comunicación masivos y dio inicio a la difusión masiva de la información. Actualmente dependemos de la comunicación inalámbrica para la comunicación por microondas tanto en tierra como hacia los satélites o incluso con planetas distantes.

Gracias a esto podemos transmitir hasta 50Mbps entre terminales en polos opuestos del planeta, a más de 20 mil Km entre sí [4].

En los últimos años los avances tecnológicos en el área de comunicaciones se han enfocado en incrementar la velocidad de transmisión de datos, mejorar la calidad de ésta y reducir el espacio ocupado por los medios de transmisión. Como resultado se ha desarrollado toda una nueva área de especialidad en sistemas inalámbricos para la comunicación entre dispositivos. La gran ventaja de estos sistemas es el que no utilizan un medio invasivo como lo son los cables de cobre y en cambio realicen el envío de datos a través del aire.



Figura 2.1 Tecnología WiFi [5]

2.2 Protocolos de comunicación inalámbrica

Los protocolos de comunicación en redes son una serie de reglas que deben de seguir todos los dispositivos conectados a la red para poder comunicarse entre ellos [6]. Pueden existir grandes diferencias entre distintos protocolos, sin embargo la mayoría de ellos se encarga de especificar una cierta acción como lo pueden ser, la forma de comenzar y finalizar un mensaje o una sesión, la forma de enviar un mensaje, qué hacer con mensajes corruptos o erróneos, etc.

Los protocolos de comunicación inalámbrica son protocolos que rigen el comportamiento de redes inalámbricas, desde la comunicación en el nivel físico hasta llegar a las capa de aplicación. Existen varios protocolos, cada uno diseñado para una aplicación especial como Wi-Fi, Bluetooth y ZigBee®.

Las tecnologías de comunicación a larga y mediana distancia más utilizadas actualmente son 3G, WiFi, WiMAX, UWB, GPRS que permiten transmisión de datos de más de 54Mbps en el caso de WiFi. Esta tecnología se utiliza en redes de información inalámbricas como lo son celulares, access points, laptops, etc.

A menor escala, se han generado tecnologías de comunicación inalámbrica para distintos propósitos. Algunas de estas tecnologías son Bluetooth, Infrarrojo, RFID y ZigBee®. Estas se diferencian unas de otras de acuerdo al tipo de aplicación para el que son útiles. Bluetooth se utiliza normalmente entre dispositivos de mayor tamaño como teléfonos celulares o laptops debido a la mayor capacidad de energía eléctrica con el que cuentan. ZigBee® es de las tecnologías que utilizan una menor cantidad de corriente y por lo tanto se pueden utilizar en dispositivos de menor tamaño.



Figura 2.2 Módulo ZigBee® comparado con una moneda de €1 [7]

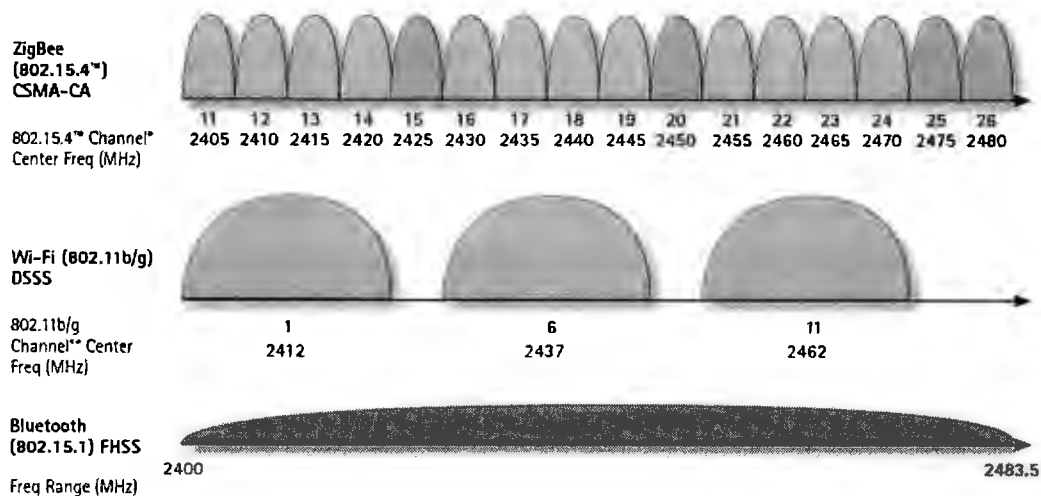


Tabla 2.2 Comparación entre los canales de ZigBee®, Wi-Fi y Bluetooth [8]

Por sus características nos interesa especialmente conocer las especificaciones de funcionamiento de ZigBee®. Las aplicaciones más interesantes



Figura 2.3 Unidad ZigBee de Digi International [9]

para este tipo de tecnologías son aquellas donde el dispositivo no es perceptible a simple vista. Incluso pueden ser instalados debajo de la piel y funcionar como un dispositivo de identificación de individuos vivos. ZigBee® comprende una serie de reglamentaciones y estandarizaciones especificadas en la IEEE 802.15.4-2003. La última actualización, ZigBee® PRO, que se hizo a las especificaciones fue en 2007 y se procura mantener dicho estándar al nivel de competencia actual de otros sistemas. Otro dato

importante es que estos dispositivos funcionan en lo que se conoce como WPAN (wireless personal área network) que comprende un área de 10m de diámetro alrededor del nodo aproximadamente.

Los principales productores de dispositivos ZigBee® son Jennic Limited (E.U.), Freescale Semiconductor, Inc. (E.U.), Ember (E.U.), Texas Instruments (E.U.), Samsung Electronics (Corea), Atmel Corporation (E.U.), entre otros. Tomemos en cuenta que a pesar de que varias de estas compañías son de origen norteamericano las plantas de producción se encuentran en su mayoría en Asia en países como

China, Taiwán, Japón, Corea, etc. Esto es debido a los menores costos de producción en dichos países. Es interesante saber qué países europeos con un importante desarrollo tecnológico como Alemania ya no poseen la tecnología para producir dichos sistemas, sin embargo, son estos países los primeros en desarrollar aplicaciones y generar exigencias para el desarrollo.

La tecnología ZigBee® presenta ventajas competitivas con respecto a otras tecnologías del mismo ámbito. Las mayores ventajas son el bajo ahorro de energía, simplicidad de los componentes y sencillez del código de programación. Debido a que las aplicaciones en las que se utilizan estos sistemas requieren bajas tasas de transmisión es posible que operen con baterías muy pequeñas que duran un periodo de tiempo bastante amplio.

En cuanto a los componentes necesarios, ZigBee® utiliza en promedio solo el 10% de lo que la tecnología Bluetooth o Wi-Fi necesita. En aplicaciones más simples este porcentaje puede reducirse hasta un 2%.

2.2.1 WiFi

WiFi es un sistema de envío de datos en redes computacionales mediante ondas de radio, lo que permite que sea de forma inalámbrica. Esta tecnología asegura la compatibilidad de equipos mediante la norma IEEE 802.11b, esto garantiza que todos los productos con el sello WiFi pueden trabajar juntos sin ningún problema de compatibilidad. Esta tecnología está diseñada para conectar ordenadores en distancias reducidas (menores a 100 metros) un uso con alcance mayor se exponen a un excesivo riesgo de interferencias. Sin embargo es posible garantizar la seguridad de las redes mediante protocolos de cifrado.

Entre las principales ventajas de las redes Wi-Fi se encuentra la comodidad que ofrece al permitir una conexión a la red dentro de un rango de superficie, evitando así los gastos de infraestructura y limitaciones de movilidad que presentan las redes de tecnología por cable, además tiene una total compatibilidad entre dispositivos Wi-Fi. Sin embargo existen algunas desventajas entre las que destaca que la velocidad de conexión es menor que en las conexiones por cables y existen

en ocasiones interferencias y pérdidas de señal. Esta tecnología no es compatible con otras inalámbricas como bluetooth, GPRS, UMTS, etc... Sin embargo la principal desventaja es la seguridad ya que algunos programas son capaces de capturar los paquetes enviados [10].

2.2.2 Bluetooth

Esta tecnología permite la transmisión de voz y datos mediante un enlace por radiofrecuencia en la banda ISM de 2.5 GHz. Esto facilita la comunicación entre equipos, elimina conectores entre estos y facilita la sincronización de datos entre equipos personales. Bluetooth es el protocolo de comunicación diseñado específicamente para dispositivos de bajo consumo, con una cobertura baja y basado en transceptores de bajo costo. Debido a que la comunicación es por radiofrecuencia los dispositivos no tienen que estar alineados y la distancia de transmisión depende de la potencia del dispositivo pudiendo ser de 1mW, 2.5mW y 100mW y cada una con un rango de 1, 25 o hasta 100 metros respectivamente para la potencia. Esta tecnología principalmente es utilizada cuando se requiere conectar dos o más dispositivos en un área reducida y sin grandes necesidades de ancho de banda. Su uso actual más común es en teléfonos y PDA [11].

2.2.3 RFID

RFID es un sistema de almacenamiento y recuperación de datos remotos mediante dispositivos denominados etiquetas, tarjetas, transpondedores o tags RFID. Su objetivo principal es transmitir la identidad de un objeto mediante ondas de radio. Los tags RFID son dispositivos que permiten recibir y responder a peticiones por radiofrecuencia desde un emisor – receptor RFID, estos pueden ser activos, semipasivos o pasivos. Los tags pasivos no requieren ninguna fuente de alimentación interna y solo se activan cuando un lector se encuentra cerca para suministrarles la energía necesaria [12].

2.2.4 Smart Dust

Smart Dust es el futuro de las WSN. Este tipo de dispositivos son nodos pero extremadamente pequeños (1mm^3) que utilizan sensores basados en sistemas microelectromecánicos (MEMS), los cuales son capaces de detectar desde vibraciones hasta iluminación [13].

Las características que se buscan con este tipo de sensores tan pequeños también conocidos como *motes* es que sean muy baratos, tengan un consumo de energía extremadamente bajo, puedan recargar su batería mediante luz solar o incluso mediante las vibraciones del piso o la pared, puedan medir cualquier variable física, generen una red de comunicación y sean muy fáciles de instalar.

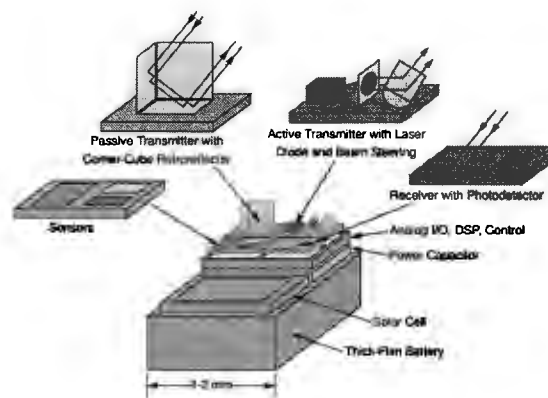


Figura 2.4 Smart Dust mote [14]

Con las características ya mencionadas se podría generar una infinidad de aplicaciones de monitoreo en tiempo real con un muy bajo costo y una gran confiabilidad. Se podrían monitorear y controlar casas, invernaderos, edificios, bosques y hasta ciudades enteras, desde el tráfico en las calles hasta la red eléctrica, el clima, fallas en edificios, etc. también se podrían realizar ciertas acciones si se cumplen algunas condiciones como cambiar el tiempo de los semáforos, activar el aire acondicionado, mandar una alerta sobre una falla en un puente, etc.

2.3 Tipos de Redes

Las redes son un conjunto de dispositivos conectados entre sí que comparten información, recursos, servicios, etc. Los elementos básicos de una red son los dispositivos (computadoras, impresoras, etc.), el medio de transmisión (cable de cobre, fibra óptica, ondas electromagnéticas), los mensajes y las reglas de comunicación (protocolos) [15].

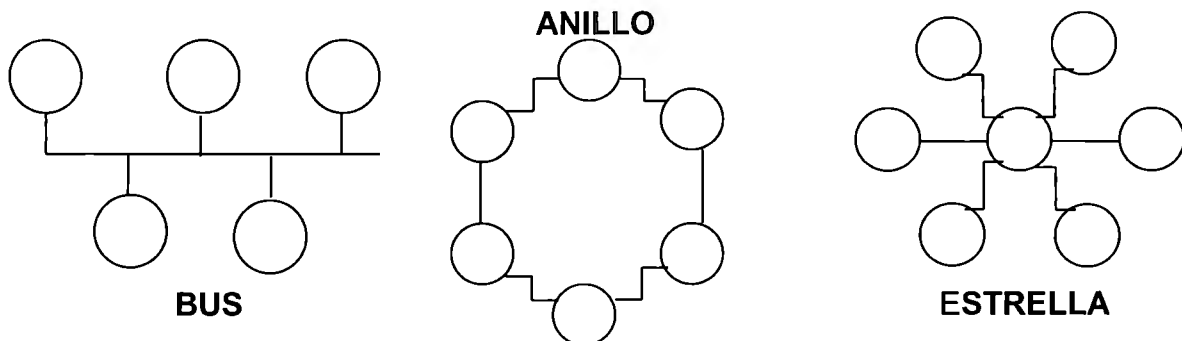
Las redes se pueden clasificar dependiendo de su alcance, forma de conexión, topología o dirección de los datos entre otras cosas.

Dentro de la clasificación por alcance encontramos [16]:

- Red de área personal (PAN) → Red en donde los dispositivos se encuentran cercanos al punto de acceso.
- Red de área local (LAN) → Red con una extensión física de aproximadamente 200 metros.
- Red de área metropolitana (MAN) → Red de cobertura amplia, cubren ciudades o municipios y pueden extenderse a más de 4 km.
- Red de área amplia (WAN) → Son redes muy grandes, capaces de cubrir países, continentes e inclusive a todo el mundo, la más importante es Internet.

Cabe mencionar que estas definiciones no son 100% correctas ya que existen otras características que las hacen diferentes, como los protocolos de comunicación que usan, además, las distancias no son limitadores, simplemente son distancias comunes para este tipo de redes.

Por su forma de conexión se pueden dividir en alámbricas e inalámbricas. Por su topología (forma de conectarse) en bus, estrella, anillo, malla, árbol, etc. [16].



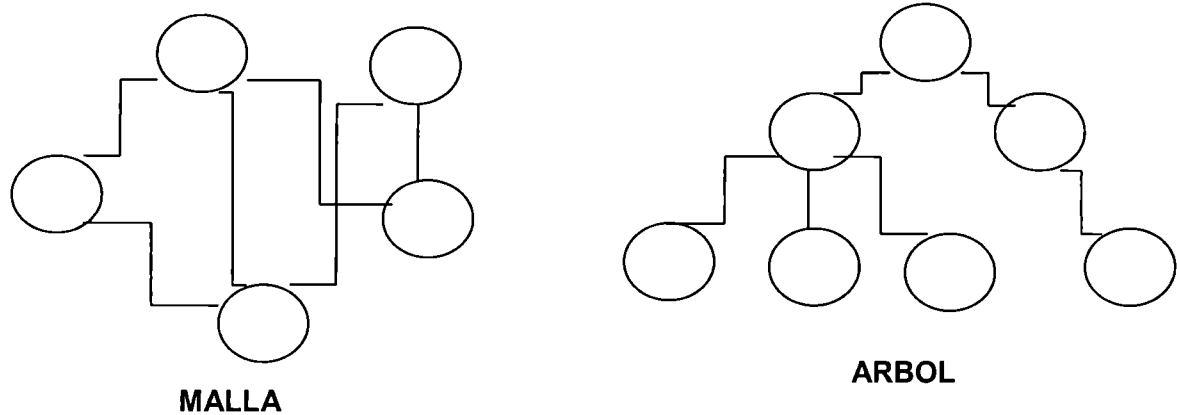


Figura 2.5 Topologías de Red

Por la dirección de los datos se pueden dividir en [17]:

- Unidireccionales→Un dispositivo transmite y otro recibe la información.
- Half-Duplex→Los dispositivos pueden enviar y recibir información, sin embargo sólo pueden realizar una acción a la vez.
- Full-Duplex→Los equipos pueden transmitir y recibir información a la vez.

2.4 ZigBee®

ZigBee® es un estándar que define una serie de protocolos de comunicación para redes inalámbricas personales (WPAN). Las tasas de datos son bajas, en general están cerca de 100 kilobits por segundo y opera en las bandas de frecuencias de 2.4GHz, 915MHz y 868MHz, siendo la más común la de 2.4GHz y utiliza 16 canales. Aunque las tasas de datos son bajas, ZigBee® fue diseñado para aplicaciones en donde esto no es muy importante como monitoreo y control de forma remota y además cuenta con las ventajas de tener un bajo costo y una vida larga de las baterías [18].

ZigBee® está basado en el estándar IEEE 802.15.4 el cual define los protocolos de las capas físicas y de control de acceso al medio y sobre éstas ZigBee® define las capas de red y aplicación. Dentro de una red ZigBee® hay tres tipos de dispositivos sin importar la topología de la red (malla, estrella, árbol) y son los coordinadores que se encargan de comenzar y controlar la red, los routers que extienden el área de cobertura de la red para esquivar obstáculos y proveer distintos

caminos para la información en caso de que un dispositivo falle y los dispositivos finales que son los que envían o reciben los mensajes [19].

Por otra parte vemos en la siguiente tabla algunos ejemplos de módulos que utilizan el protocolo ZigBee®.

Nombre del módulo	Compañía	Procesador incluido	I/O	Comunicación serial	ADC	Rango máximo en espacio abierto/cerrado	Costo
Xbee® Series 2.5 [21]	Digi	-	10	UART	10 bit	120/40 m	26 usd
Xbee® -Pro Series 2.5 [22]	Digi	Freescale S08 (sólo unos modelos)	10	UART	10 bit	1600/90 m	38 usd*
MicaZ [23]	Crossbow	Atmega 128L	conector de expansión de 51 pines	UART	10 bit	75-100/20-30 m	150-300 usd**
SunSpot [24]	Sun Microsystems Laboratories	ARM920T	5+ sensor board	-	10 bit		550 usd***

Tabla 2.3 Comparación de algunos nodos ZigBee®

*El costo de los Xbee® es por unidad sin procesador incluido

**El costo del MicaZ es por una unidad y varía dependiendo la placa de sensores que se desee

***El costo del SunSpot incluye dos nodos y una estación base



Figura 2.6 MicaZ, SunSpot, Xbee® de izquierda a derecha [23] [24] [25]

2.5 Ejemplos relevantes del uso de la tecnología ZigBee®.

2.5.1 Asistencia a pacientes

La empresa Awarepoint da la opción, a instituciones del cuidado de la salud con pacientes en tratamiento, de mapear el equipo, monitorear actividades y medir el desempeño para mejorar tanto el cuidado de los pacientes como el bienestar de los procesos administrativos. De esta forma los médicos y encargados pueden observar y analizar los movimientos de los pacientes y el estado del equipo. De esta forma se procura la seguridad de los pacientes, se tiene información el flujo de estos y se mejora la ingeniería clínica mientras hay control y prevención de pérdida de equipo y así se reducen altos costos de reemplazo.

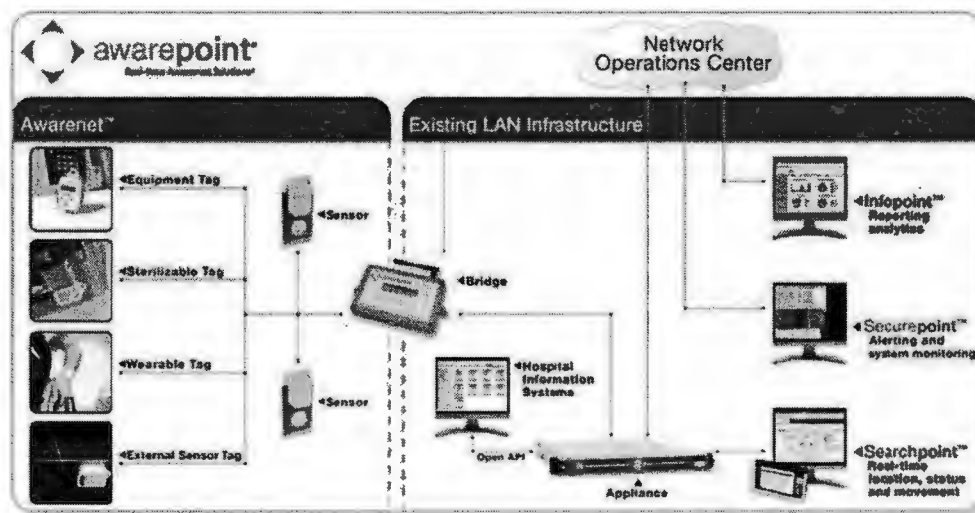


Figura 2.7 Equipo Awarepoint I271

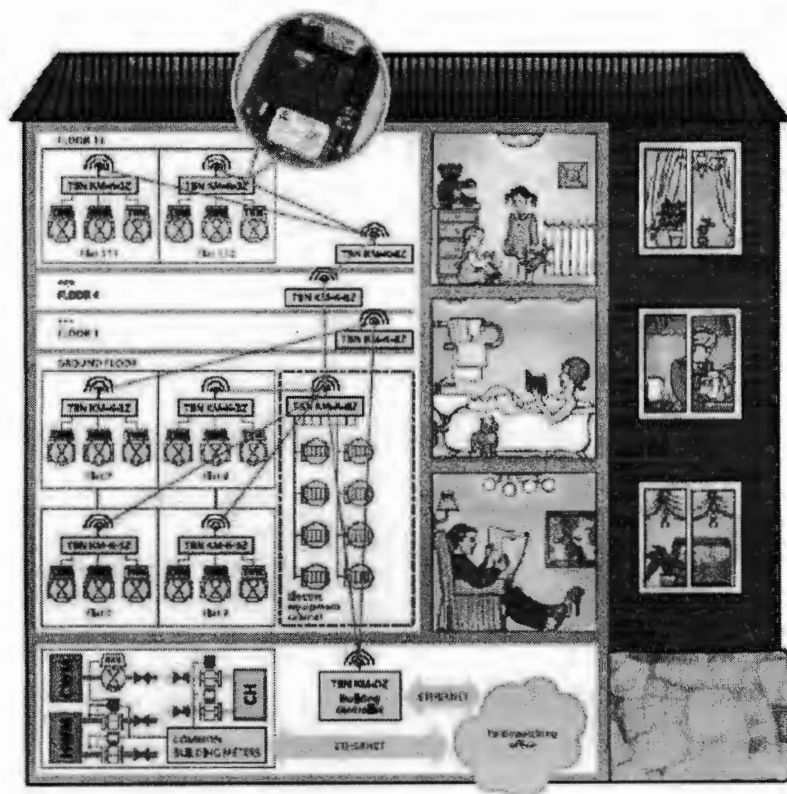
2.5.2 Seguridad en hoteles

Durante los últimos años una preocupación importante de la industria hotelera es la mejora de los sistemas de seguridad y la disminución en los costos de aseguramiento. Este problema ha sido resultado por medio de ZigBee® por la compañía TimeLox AB. Anteriormente era común la pérdida de llaves metálicas de las habitaciones lo cual no solo implicaba gastos sino una oportunidad para el robo de bienes. Por medio de fuertes cambios tecnológicos como tarjetas inteligentes y

software seguro se ha logrado evolucionar a un sistema electrónico de llaves con capacidades y características muy por encima de los sistemas antiguos.[28]

2.5.3 Monitoreo de recursos en un hogar

La compañía Telegesis y la tecnología ZigBee® se han enfocado en el monitoreo y



Telegesis ETR@ ZigBee Module (inset) utilized in apartment AMR solution

contabilización precisa del consumo de recursos en hogares ya sea gas, electricidad o agua. Estos rubros implican los mayores gastos en el hogar a nivel mundial. Este tipo de sistemas de monitoreo no solo ayudan a los residentes del lugar a tener conocimiento y control constante de dicho aspecto sino que proporcionan una base de medición y adquisición de información confiable para la administración de cada población.

Figura 2.8 Diagrama del sistema Telegesis ETRX [29]

2.5.4 Edificios inteligentes - crecimiento urbano inteligente

La demanda energética a nivel mundial sigue aumentando aceleradamente. Las economías más desarrolladas son las que enfrentan mayores retos en este sector. En esta lógica, debe tomarse una perspectiva diferente para el recurso de los energéticos. En lugar de permitir un crecimiento constante y descontrolado de la demanda energética debe administrarse rigurosamente el uso de lo ya disponible. La administración energética debe migrarse del plano global al plano puntual donde.

Esto se traduce en vigilar cada punto consumidor, como los son edificios en una ciudad, para mejorar la situación en el plano mayor que son las ciudades.



Figura 2.9 Habitación de hotel inteligente [30]

Hong Kong Hotel Suite

2.5.5 Reducción de contaminantes en plantas industriales

La necesidad de reducir gases de efecto invernadero mientras se incrementa la eficiencia en el consumo energético es un reto global que las plantas industriales están tomando muy en serio. Más de un tercio de la energía disponible es destinada a actividades industriales. Por si fuera poco la competencia sigue en aumento, por lo que es necesario reducir costos de producción sin sacrificar calidad en los productos. Aunado a esto, los cambios impredecibles del precio de los energéticos afectan negativamente las estimaciones de los productores en cuanto a ganancias estables y constantes. La compañía Siemens, tomando en cuenta esto, se ha enfocado en la optimización y uso eficiente de los energéticos que no solo son una estrategia medioambiental sino también una estrategia de negocios muy eficiente en la actualidad.



Figura 2.10 Equipo ZigBee® de Siemens [31]

2.5.6 Invernaderos “wireless”

GreenPeak Technologies se ha afianzado de ZigBee® para desarrollar áreas controladas para sembradíos. Los primeros intentos hace algunas décadas requirieron de un gran esfuerzo para excluir la influencia de elementos externos y aún mucho más para controlar los internos como calor y humedad adecuados. Hoy en día los invernaderos son una tecnología de producción de alta eficiencia controladas por sistemas computarizados que brindan información general en todo momento del lugar de siembra.



Greenhouse Harvesting Cart

Figura 2.11 Invernadero con tecnología de sensado inalámbrico [32]

2.5.7 Iluminación en el espacio de trabajo

Actualmente es posible tener un almacén al que uno entre sin necesidad de encender las luces pues conforme uno avanza se van activando los sistemas de iluminación automáticamente. Light Corporation se especializa en la instalación de



sistemas integrales de iluminación inteligente y no solo eso, integran también el control de la calefacción, aire acondicionado y reconocimiento del equipo que la persona utiliza en ese momento como su laptop. Además se notifica se cualquier eventualidad que se suscite ya sea que esté o no la persona en el lugar en ese momento.

Figura 2.12 Ejemplo de aplicación de Light Corporation [33]

2.5.8 Entretenimiento automático

Imaginemos acercarnos al reproductor de DVD, insertar una película y sentarnos en el sofá. A continuación el televisor sintonizará la entrada conveniente para el reproductor. El equipo de sonido se iniciará en las condiciones de reproducción preferidas por el usuario. Las cortinas bajarán automáticamente y la iluminación también se ajustará. Esto se logra por medio de la intercomunicación de los dispositivos en un ambiente cualquiera y se puede lograr con la tecnología ZigBee® como hasta ahora lo ha hecho la empresa AMX.



Figura 2.13 Control remoto con ZigBee® [34]

2.5.9 Red eléctrica inteligente

Los habitantes de California han sufrido lo que pensaban no pasaría. Durante el año 2000 sufrieron la pérdida del suministro energético durante varios días en varias ocasiones. Esto sucedió durante los meses de verano durante los cuales es casi indispensable el uso de sistemas de aire acondicionado. Cellnet + Hunt se ha involucrado en la problemática desarrollando sistemas de monitoreo de las instalaciones eléctricas que permitan conocer la causa de las fallas y la localización de las mismas en poco tiempo. La importancia de este proyecto radica en las inmensas pérdidas que se tienen cada vez que se generan fallas como las ocurridas en el año 2000.

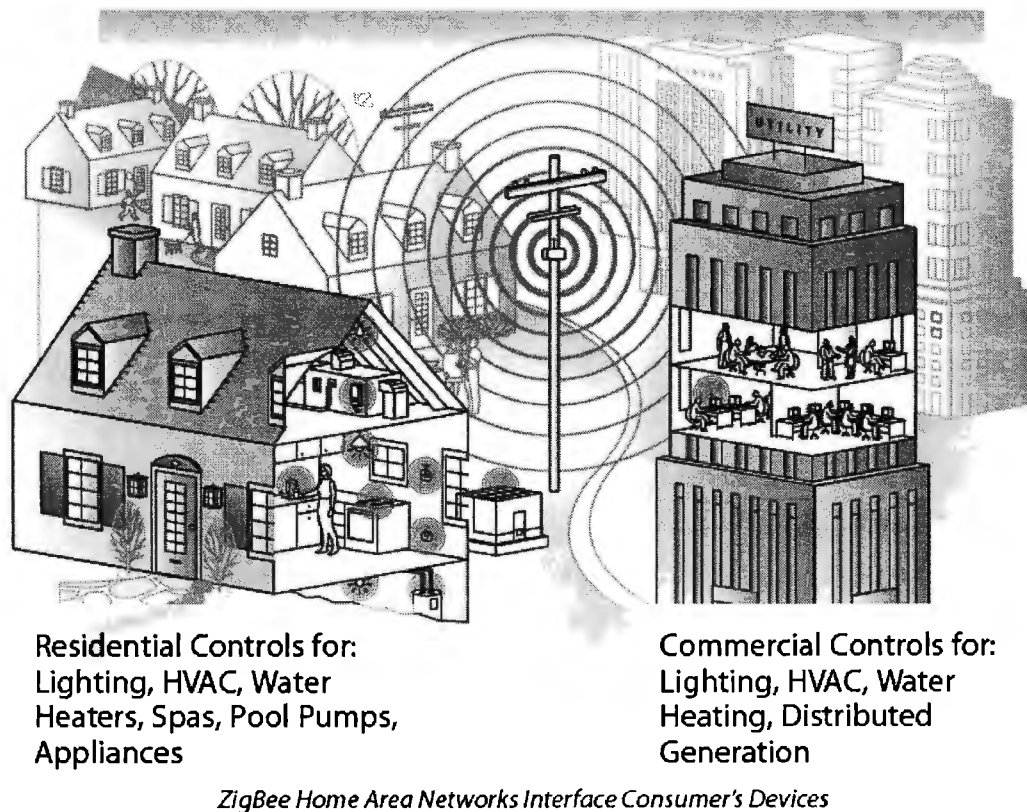


Figura 2.14 Aplicación en la red eléctrica [35]

Capítulo 3

Desarrollo del Proyecto

3.1 Descripción del sistema

A continuación, en la Figura 1 se observa un diagrama del modelo de conexión básico del sistema. Las partes principales que lo componen son los nodos sensores, los routers, el coordinador central unido al procesador en el sistema Arduino, la conexión a la red por medio del Ethernet Shield y una computadora desde donde el usuario realizará la monitorización de la información.

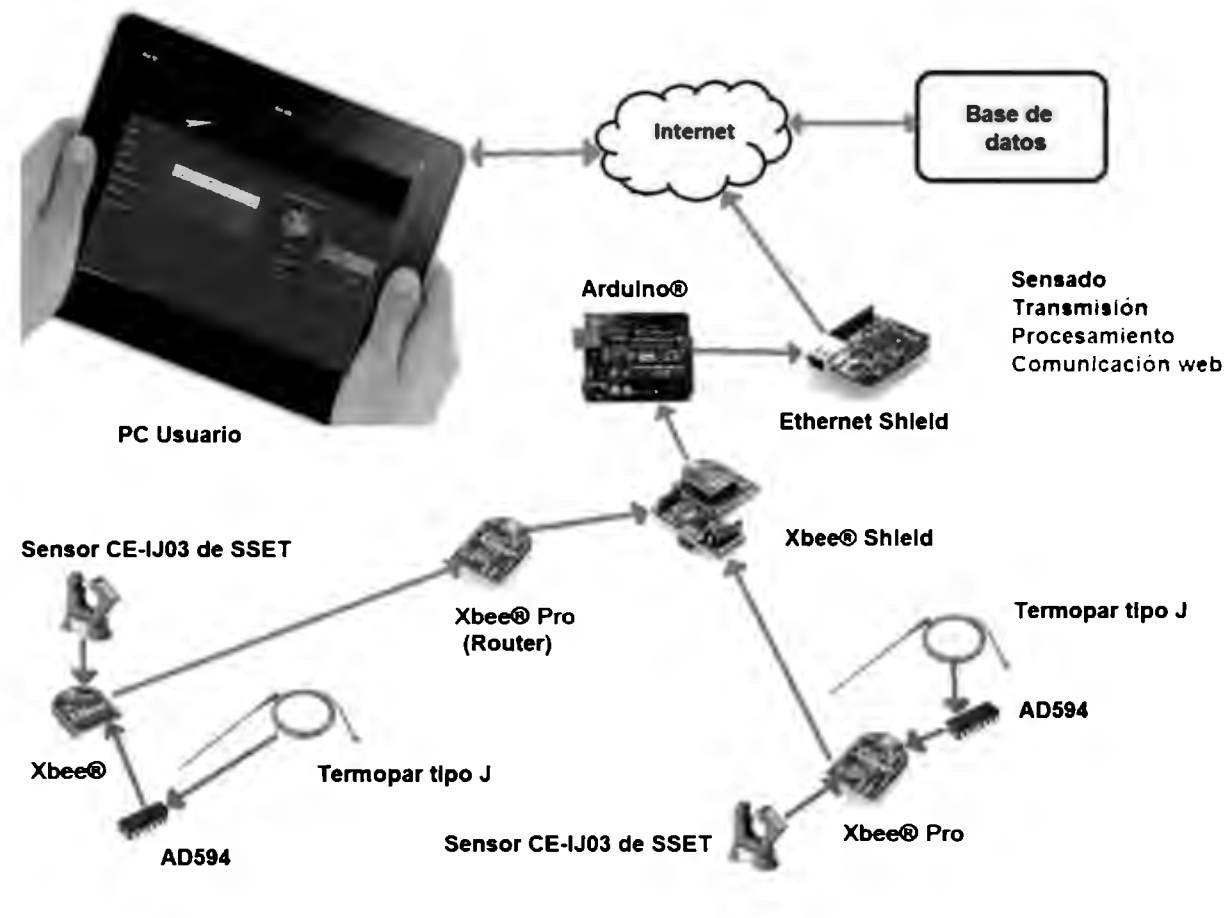


Figura 3.1 Modelo del sistema

3.2 Selección del equipo

Se utilizaron como algunos criterios de selección el precio, tamaño, adaptabilidad a distintas aplicaciones y alcance. Se hizo una comparación entre distintos dispositivos algunos de los cuales podemos observar en la tabla 3.2.1. Al final se decidió utilizar tanto Xbee® como Xbee® Pro debido a que eran más económicos, más fáciles de conseguir en México, su tamaño es menor, tienen un mayor alcance, no tienen un procesador ni sensores integrados lo cual nos da la posibilidad de adaptarlo a cualquier tipo de sensor y elegir el procesador que deseemos.

Ya contando con los nodos Xbee®, se planeaba controlar al coordinador directamente desde una computadora y a su vez, mandar instrucciones a los otros Xbee® para controlar la red entera, sin embargo investigando un poco sobre las aplicaciones actuales con módulos Xbee®, nos encontramos un microcontrolador conocido como Arduino (del cual hablaremos más adelante) que nos facilitaría esta tarea, por lo cual nuestro proyecto dio un giro, enfocándose a una aplicación de monitoreo remota y sin necesidad de tener una computadora en donde se encuentre la aplicación.

3.2.1 Descripción del equipo

Xbee® y Xbee® Pro (serie 2)

Los Xbee® de la serie 2 cuentan con la configuración de pines que se muestra en la siguiente figura.

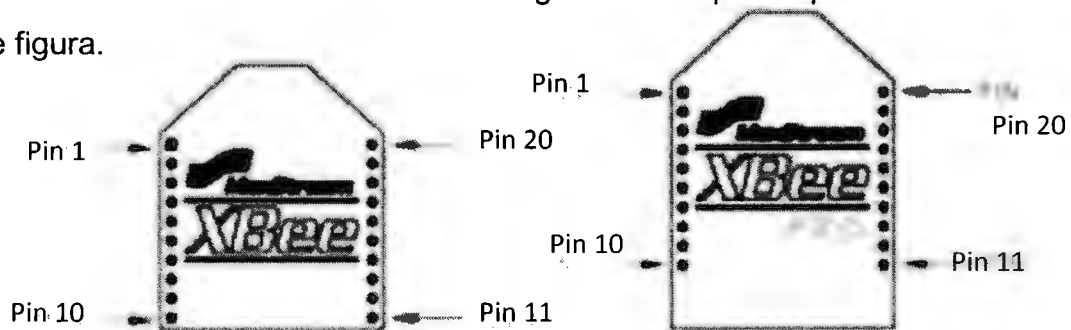
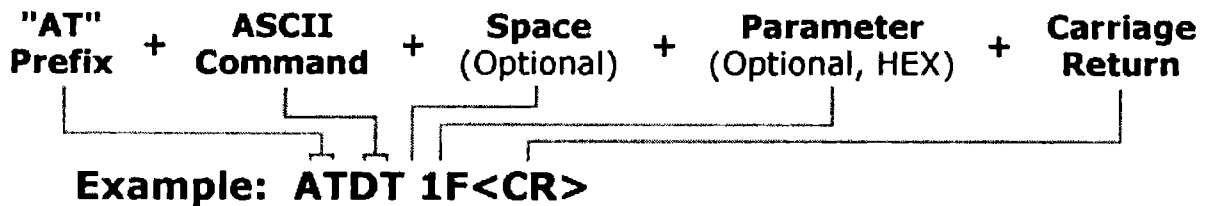


Figura 3.2 Configuración de los nodos Xbee y Xbee PRO [36]

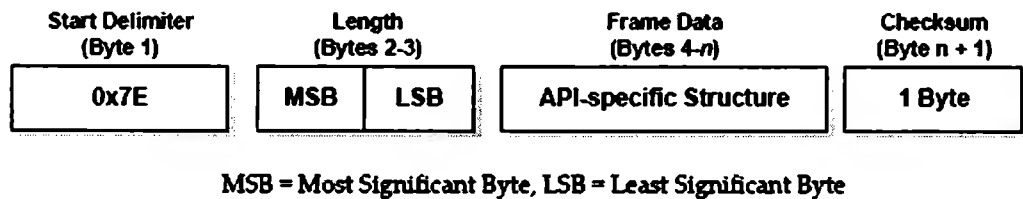
Por otra parte los Xbee® cuentan con 2 modos de operación AT (*Application Transparent*) y API (*Application Programming Interface*) de los cuales cada uno tiene sus ventajas y desventajas.

El modo AT tiene la ventaja de que es más fácil de utilizar, mientras que el modo API tiene la ventaja de ser capaz de mandar datos a varios destinatarios a la vez, cuando recibe información puede detectar qué dispositivo mandó la información, configurar dispositivos de la red de manera remota y recibir muestras de las entradas digitales de otros dispositivos.

La sintaxis de las instrucciones del modo AT es la siguiente:



Por otra parte la estructura del modo API es:



Las unidades Xbee® de la serie 2 pueden tener 3 funciones: coordinador, router y dispositivo final. La estructura general de una red Xbee® se puede ver en el siguiente dibujo.

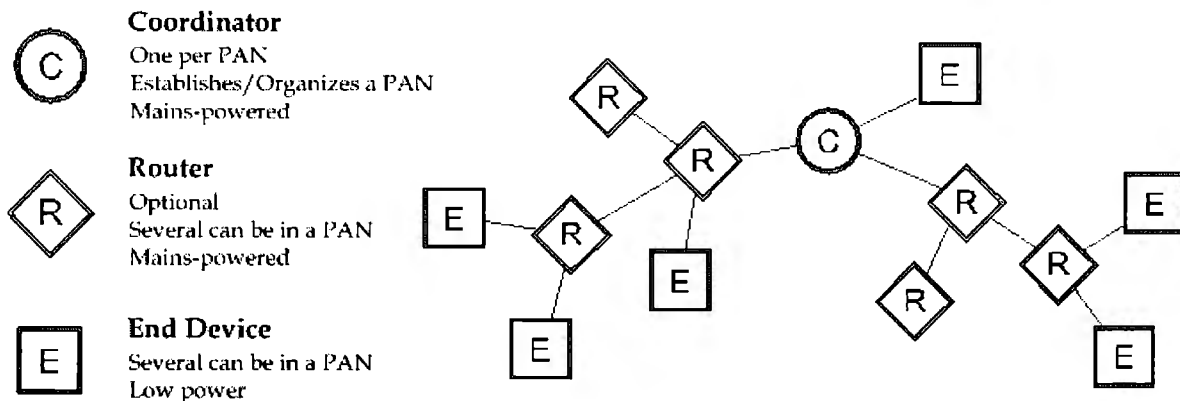


Figura 3.3 Ejemplo de configuración de red [36]

Como podemos apreciar solamente puede existir un coordinador por red el cual puede tener conectados un máximo de 10 hijos (dispositivos finales) y un número ilimitado de routers. Por otra parte cada router puede a su vez tener conectados 12 hijos y una vez más un número ilimitado de routers.

Esta forma de organización se hace de manera automática siempre y cuando cada dispositivo haya sido configurado correctamente desde el inicio, esto es que los dispositivos tengan la misma PAN ID (*Personal Area Network ID*) y se encuentren en el mismo canal, y en caso de que desaparezca un router, los hijos pueden buscar automáticamente otro router para mantenerse unidos a la red.

El envío de la información se puede hacer con una dirección destino o mediante un broadcast. En el caso de que se tenga una dirección destino especificada, en primer lugar se manda un broadcast para descubrir una ruta y una vez que se tiene la ruta se manda la información. En la siguiente figura R3 intenta mandar un mensaje a R6 y lo que observamos es el broadcast para encontrar la ruta a través de la malla que se genera entre los Xbee® y la respuesta de la ruta encontrada.

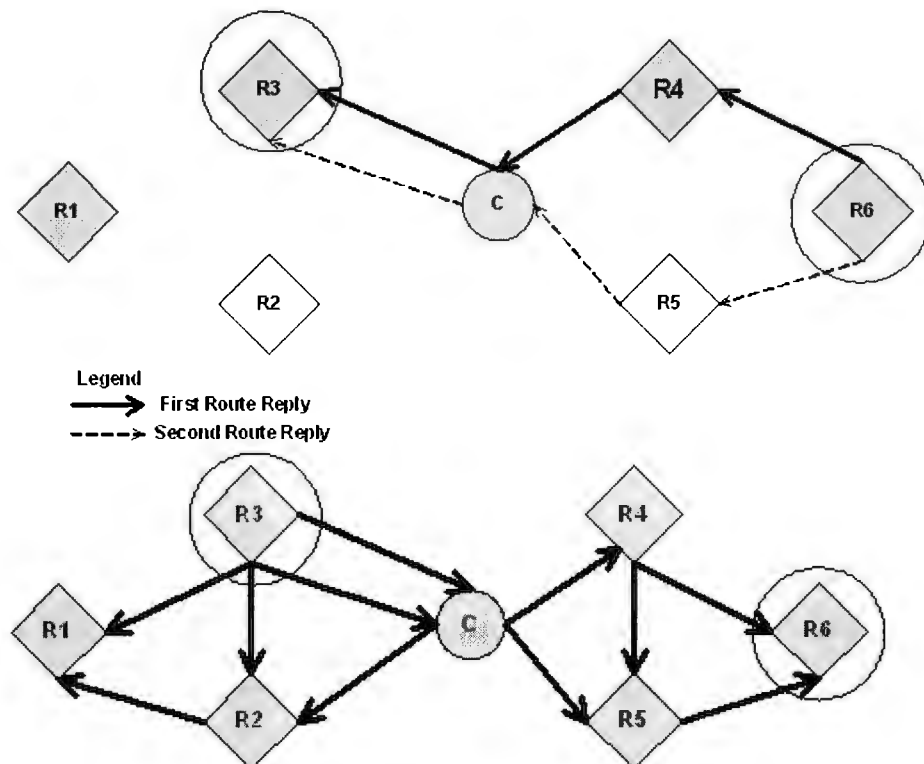


Figura 3.4 Establecimiento de la comunicación en la red [36]

Programa X-CTU

Este software es desarrollado y distribuido por Digi, la misma empresa que fabrica los Xbee®, y sirve para dar a los usuarios una forma simple y gráfica de interactuar con el firmware de los módulos Xbee® y Xbee® Pro. El programa tiene 4 pestañas las cuales explicaremos a continuación.

- **PC Settings**→En esta pestaña se selecciona el puerto COM a través del cual se desea conectar con el Xbee® y se eligen los parámetros de comunicación (Baudios, paridad, número de bits). Además tiene un botón (Test/Query) el cual prueba que efectivamente exista comunicación entre la computadora y el módulo Xbee®.

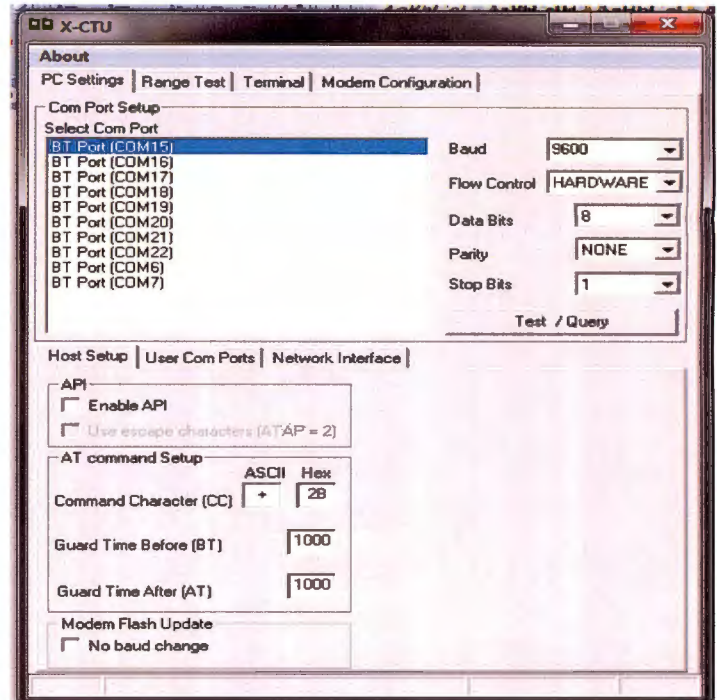


Figura 3.5 PC Settings

- **Range Test**→Esta pestaña sirve para realizar pruebas de alcance entre dos radios. En el programa se aprecia el número de datos erróneos y correctos, y si se desea, se puede observar la intensidad de la señal habilitando la opción RSSI.

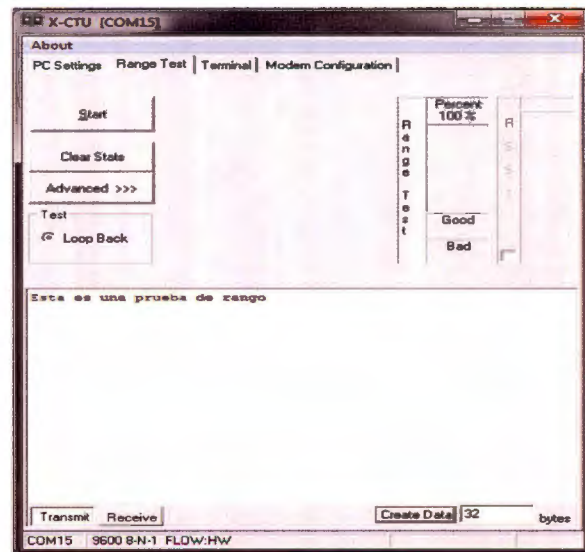


Figura 3.6 Range Test

- **Terminal**→En esta pestaña se emula una terminal, en la cual se pueden enviar y recibir datos y paquetes. Los datos enviados se ven de color azul, mientras que los recibidos se muestran de color rojo.

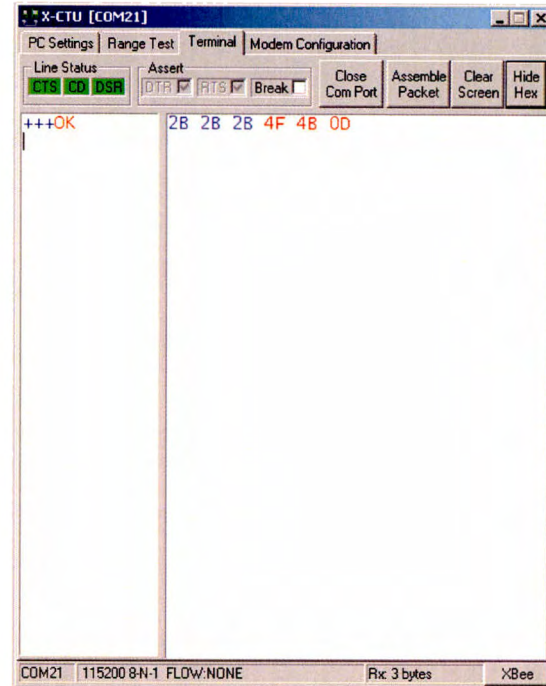


Figura 3.7 Terminal

- **Modem Configuration**→Esta pestaña sirve básicamente para leer o modificar el Firmware del módulo conectado de manera gráfica y sencilla, entre las cosas que se pueden modificar tenemos la función del módulo (coordinador, router, dispositivo final), el modo de operación el PAN ID y la dirección destino entre otras cosas.

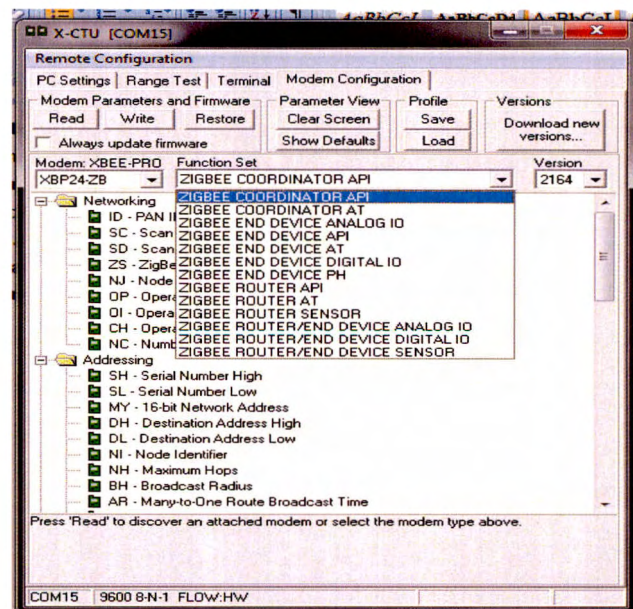


Figura 3.8 Modem Configuration

Arduino

Arduino es un proyecto abierto (*open source*) tanto de software como de hardware, es decir, los desarrolladores tienen abierto al público tanto las librerías como el diseño electrónico de distintas aplicaciones para que las puedan utilizar tanto personalmente como comercialmente sin costo alguno. Arduino se basa en un microcontrolador ATMEGA168, 328 ó 1280 con un sistema pre programado el cual sirve para programar el ATMEGA en un lenguaje de programación especial de Arduino que se basa en el lenguaje Wiring y es muy similar a C.

Al ser un proyecto abierto, distintas personas alrededor del mundo han diseñado plataformas de hardware y librerías de software capaces de interactuar con el microcontrolador de una manera sencilla, por ejemplo se encuentra el Arduino Lilypad el cual es un sistema de Arduino que se puede coser en telas y se puede lavar sin que se dañen sus componentes, el Xbee® Shield el cual sirve para conectar un Xbee® al Arduino y junto con su librería facilitan el envío de comandos ya que no es necesario generar los paquetes que contienen instrucciones en modo AT o API, la librería lo hace automáticamente, el Ethernet Shield el cual conecta a un Arduino a un router o switch vía Ethernet, el Motor Shield el cual sirve para controlar motores de DC y leer encoders de manera sencilla y el WiShield el cual conecta a un Arduino a un router vía Wi-fi, entre otros. Dado nuestro proyecto decidimos utilizar tanto el Xbee® shield como el WiShield para lograr la comunicación a la red desde nuestros sensores.

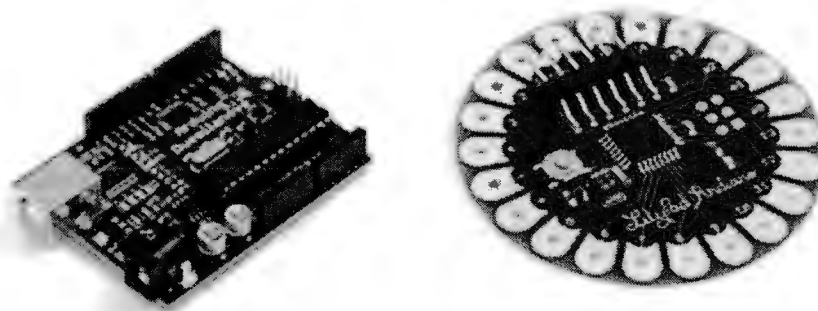


Figura 3.9 Arduino Main Board y Arduino Lilypad [37] [38]

Las características principales de los Micro controladores ATMEGA que forman parte del proyecto Arduino las podemos ver a continuación.

	ATMEGA 328	ATMEGA 1280
Digital I/O Pins	23	54/86
Analog Input Pins	10	8/16
Timers	2 – 8 bits 1 – 16 bits	2 – 8 bits 4 – 16 bits
Flash Memory	4Kb – 32 Kb	64Kb – 256Kb
SRAM	512b – 2Kb	8Kb
EEPROM	256b – 1Kb	4Kb

Tabla 3.1 Características de los micro controladores de Arduino

Existe también una plataforma de hardware llamada Arduino FIO, la cual contiene el sistema de Arduino junto con una conexión para Xbee® en una misma tableta, la cual pensamos utilizar una vez que el proyecto se encuentre terminado ya que el microcontrolador es de montaje superficial, por lo que si se nos quema o pasa algo tendríamos que comprar un nuevo Arduino FIO completo y no solamente el microcontrolador.

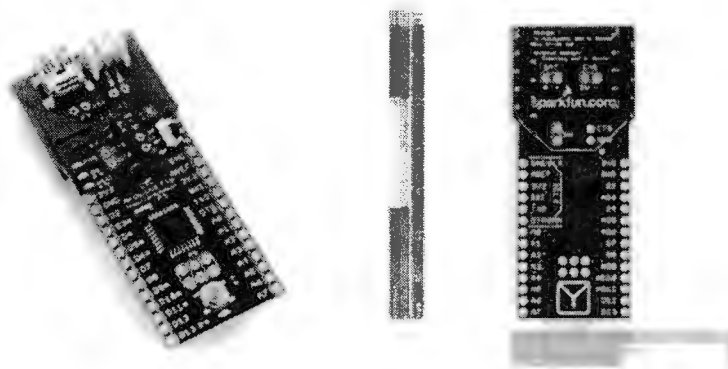


Figura 3.10 Arduino FIO [39]

Xbee® Shield

El módulo Xbee® Shield es un módulo que conecta los pines de 3.3V y GND del Arduino Main Board con los pines VCC y GND del Xbee®, asimismo conecta los pines Tx y Rx de Arduino con los pines DOut y DIIn del Xbee® para comunicar de manera serial microcontrolador con el Xbee® y poder mandarle las instrucciones.

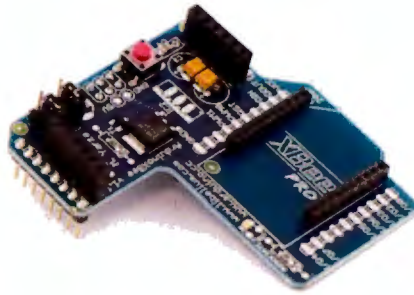


Figura 3.11 Xbee® Shield [40]

3.3 Sensores

Para la selección de los dispositivos a utilizar como sensores se consideró un escenario en la industria donde las temperaturas críticas se encuentran cercanas a los 300°C y los rangos de corriente eléctrica cercanos a los 100 A.

Los factores de instrumentación

3.3.1 Temperatura

La siguiente tabla muestra una comparación de tres sistemas de medición de temperatura.

INSTRUMENTO	Termopar	RTD	Termistor
Ventajas	Simple	Más exacto	Señal de salida alta
	Robusto	Más estable	Más sensible
	Económico	Son los más lineales de los 3	
	Rangos altos de temperatura		
	No requiere fuente de poder		
Desventajas	No lineal	Costoso	No lineal
	Señal pequeña	Lento	Rango de temperatura limitado
	Requiere referencia	Requiere fuente de poder	Requiere fuente de poder
	Menos estable	Poca variación en la resistencia	Frágil
	Menos sensible	Auto calentamiento	Auto calentamiento

Tabla 3.2 Comparación entre termopar, RTD y termistor

Considerando al termopar como la mejor opción en este caso por la facilidad de acondicionamiento de su señal y no necesitar fuente de alimentación nos disponemos a conocer los tipos de termopares disponibles comercialmente. Estos se clasifican por el tipo de unión metálica y de esto dependerá el rango de temperatura al que puedan operar.

- E → -100 a 1000°C
- J → 0 a 760°C
- K → 0 a 1370°C
- R → 0 a 1000°C
- S → 0 a 1750°C
- T → -160 a 400°C

En este caso el tipo J es el más adecuado para nuestro escenario modelo.

Tipo	Conductores		Códigos de color		Rango
	Aleación (+)	Aleación (-)	Grado Termopar	Grado Extensión	
J	Hierro Fe	Constantano Cu-Ni			Grado Termopar 0 a 750°C Grado Extensión -60 a 200°C

Tabla 3.3 Especificaciones termopar J 1



Figura 3.12 Termopar tipo J

Para el acondicionamiento de la señal a la salida del termopar es necesario implementar un circuito integrado AD594 encargado de transformar el voltaje proporcionado por el termopar en una señal lineal de

10mV/°C. Esto se logra por medio de un divisor de voltaje. La siguiente ilustración muestra el diagrama de funcionamiento del circuito.

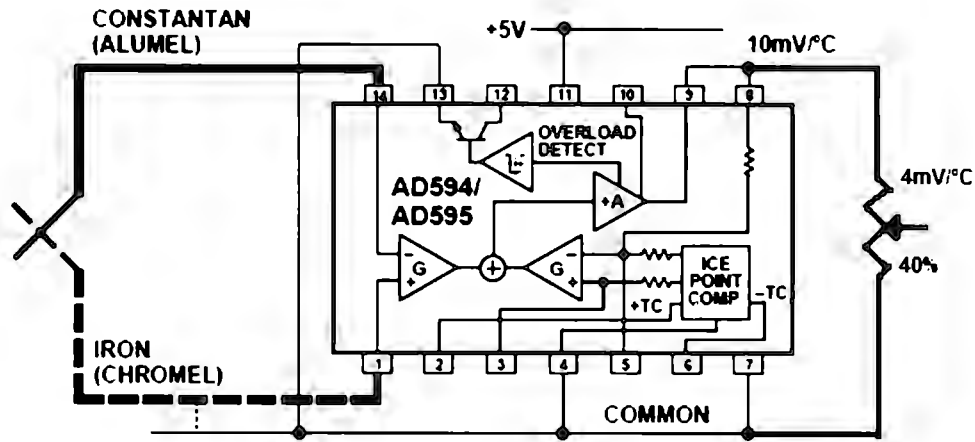


Figura 3.13 Diagrama de conexión del AD594

3.3.2 Corriente

Al revisar las alternativas disponibles para sensar los cambios en la corriente eléctrica se ha decidido implementar un transductor de corriente con un rango de operación entre 0 y 300 A (ac). A la salida de este dispositivo se obtiene una señal lineal de 0 a 10V que implica un cambio de 33.33mV/A. El principio de operación de este dispositivo es el de inducción electromagnética y debido a esto es posible sin la necesidad de alimentación externa. Este aspecto es otro punto decisivo considerando que se desea mantener al mínimo el consumo de energía.

Posteriormente es necesario realizar un acondicionamiento de la señal y reducirla a un 10% de su magnitud, es decir de 10 V a 1 V (3.3mV/A) de modo que pueda acoplarse a los nodos Xbee® cuya máxima tensión de entrada es 1.3 V.

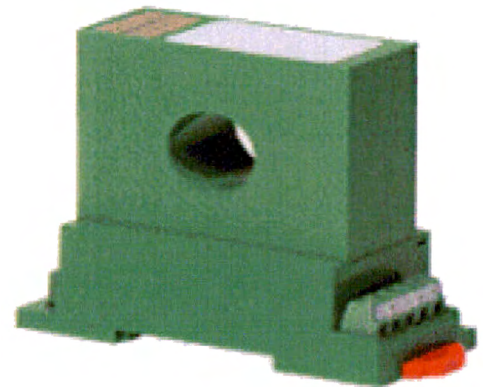


Figura 3.14 Sensor de corriente

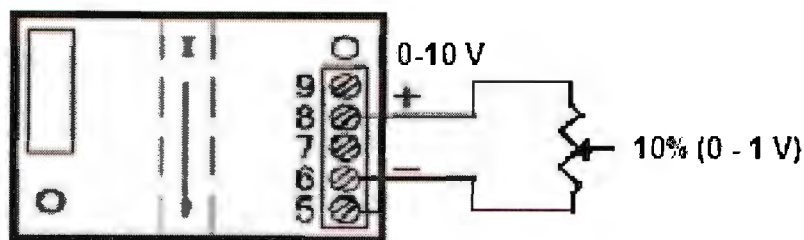


Figura 3.15 Diagrama de conexión del sensor de corriente

3.4 Detalles de instrumentación

Los nodos Xbee® y Xbee® -PRO cuentan con un ADC de 10 bits, esto implica una numeración de 1024 valores. Otro factor a considerar es que el voltaje máximo de entrada en el ADC es de 1.3 V que implica una división de 1.27 mV/bit. Habiendo establecido esto podremos establecer la resolución para ambos equipos de sensado. En nuestro equipo de sensado de temperatura tenemos a la salida un cambio de 4 mV/C° que equivale a 0.317 °C/bit. En el equipo de sensado de corriente se maneja un cambio de 3.3 mV/A que equivale a 0.381 A/bit.

3.5 Conexión a Internet

3.5.1 Ethernet shield

Con el equipo Ethernet shield de Arduino es posible generar una conexión entre el microprocesador e internet por medio de Ethernet. Los parámetros a configurar son únicamente los básicos para permitir el funcionamiento de un equipo conectado a una red de área local que son: dirección IP, máscara de red, dirección MAC y puerta de enlace predeterminada. Con este equipo la información fluye del Xbee® al Xbee® shield, de ahí al microprocesador de Arduino y de éste al Ethernet shield que se encargará de enviar la información a la red. La siguiente imagen muestra el equipo descrito.

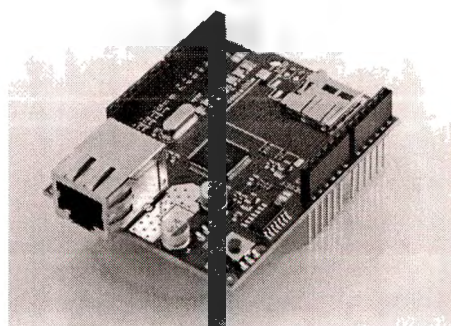


Figura 3.16 Ethernet Shield [41]

3.6 Sitio Web

Se desarrolló una página (HTML) en internet en la cual se pueden observar las mediciones realizadas por los Xbee®. La página cuenta con las siguientes secciones:

Home

Esta es la página de inicio y aquí se explica brevemente el contenido de cada una de las secciones de la página, ver figura 2.



Figura 3.17 - Página <<Home>>

About

Muestra un pequeño mensaje sobre la página.



Figura.3.18 - Página <<About>>

Data

Se muestran 3 tipos de información diferentes en esta sección:

La primera es una tabla (izquierda) en donde podemos ver la última medición de temperatura y corriente realizada por cada Xbee® junto con la fecha y hora a la que se realizó esa medición. La segunda es una tabla (derecha) con dos columnas que nos muestran cuáles de los Xbee® que en algún momento han enviado una medición se encuentran activos y cuáles se encuentran inactivos. Al estado de inactividad se pasa cuando un Xbee® no ha mandado el valor de una nueva medición en un cierto tiempo especificado en la sección de Settings.

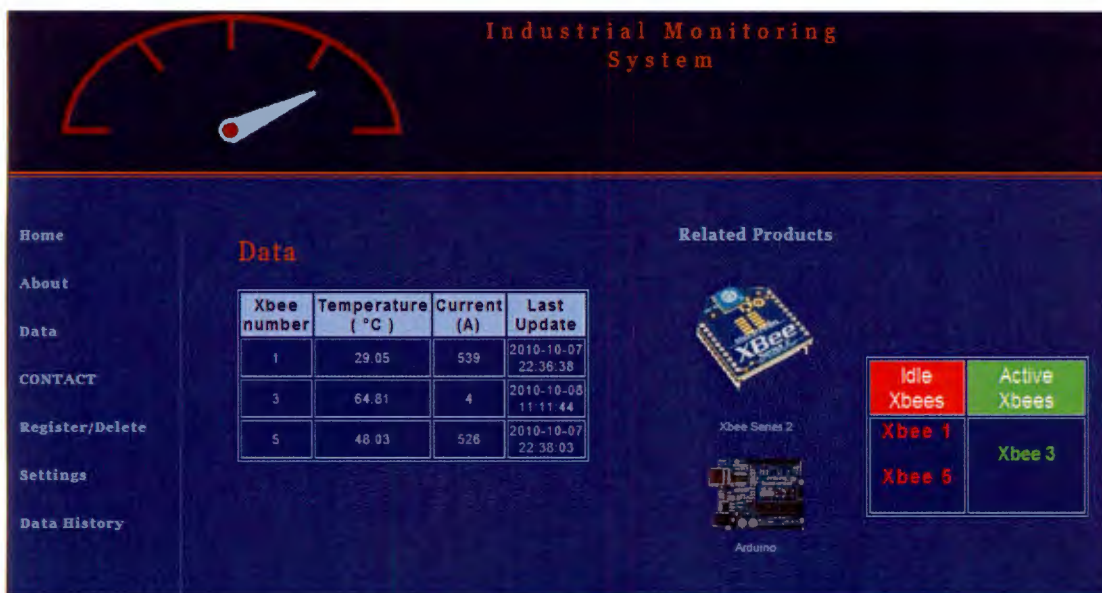


Figura 3.19 - Página <<Data>>

Por último si el valor medido, ya sea de corriente o temperatura, por alguno de los Xbee® es mayor que uno definido por el usuario en la sección de Settings la página muestra un mensaje de advertencia en forma de cuadro de diálogo. Cabe mencionar que la página se actualiza cada 5 segundos modificando los valores de las tablas en caso de que haya nuevas mediciones.

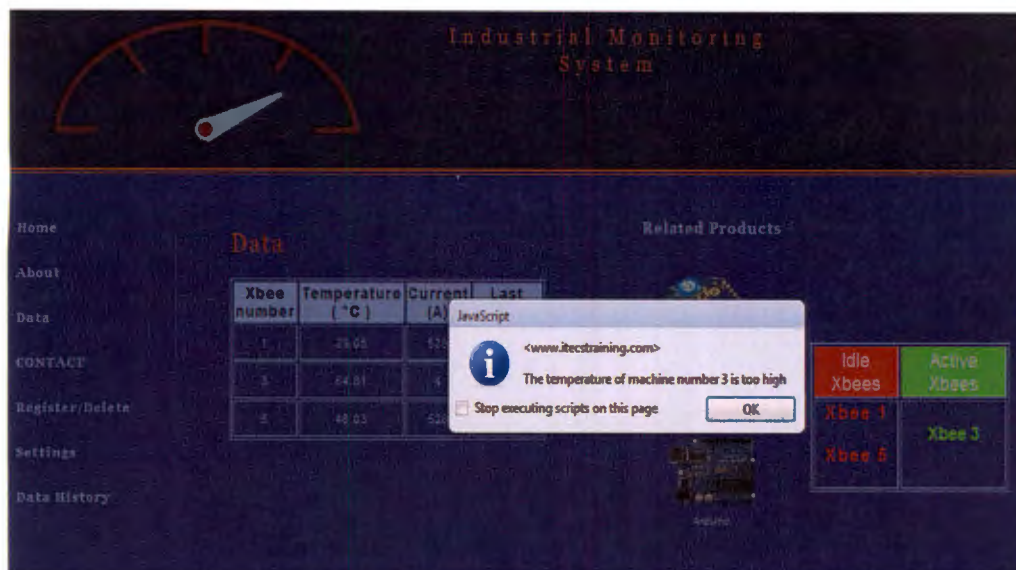


Figura 3.20 - Cuadro de advertencia

Contact

Muestra la información de contacto en caso de que se desee saber más sobre la página o el sistema.



Figura 3.21 - Página <<Contact>>

Register/Delete

Esta sección tiene dos usos. El primero es introducir manualmente los valores de una medición, lo cual solamente sirve para probar la página, y por esta razón esta parte será eliminada del sitio web final. El segundo uso es eliminar toda la información que se tenga sobre algún Xbee® en caso de que ya no se vaya a utilizar y no se quiera ver la información que alguna vez existió.

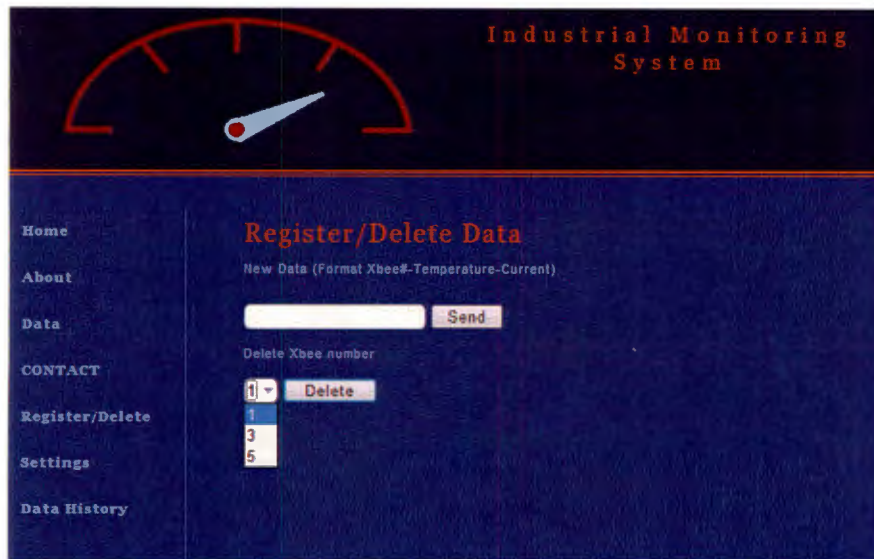


Figura 3.22 - Página <<Register/Delete Data>>

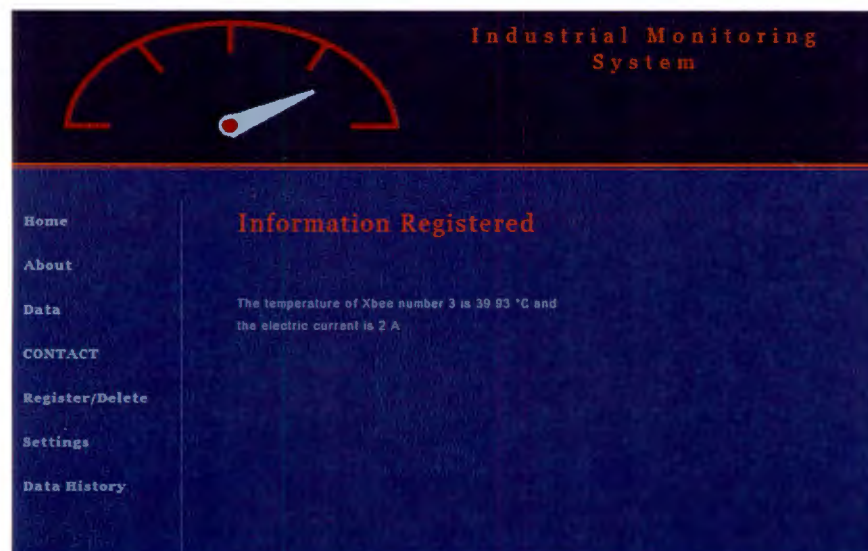


Figura 3.23 - Confirmación de registro

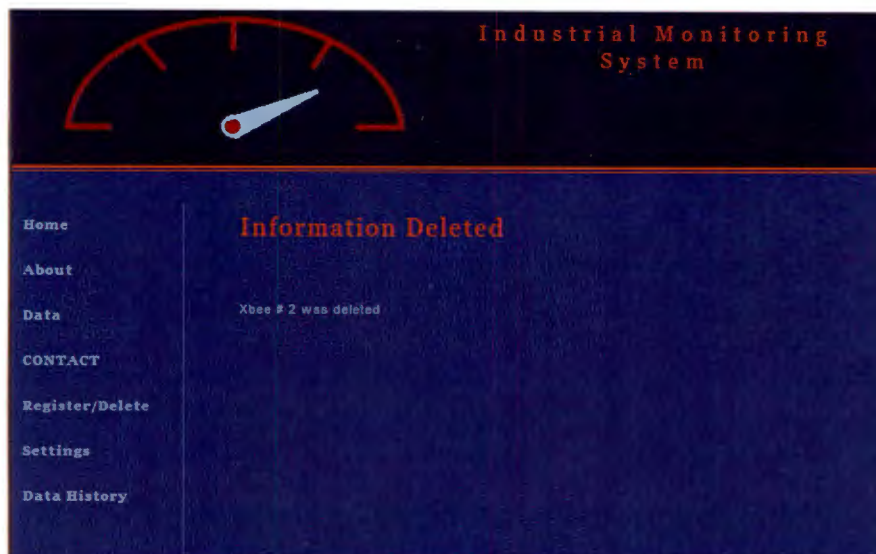


Figura 3.24 - Confirmación de eliminación de registro

Settings

En esta sección el usuario puede configurar 3 parámetros dependiendo de sus necesidades, los cuales son el tiempo de inactividad de los Xbee®, la temperatura máxima y la corriente máxima. Los valores que se elijan en esta sección repercuten en otras como la de *Data* sobre la cual ya se comentó y sobre la de *Data History* la cual se verá a continuación.



Figura 3.25 - Página <<System Settings>>



Figura 3.26 - Confirmación de cambio de especificaciones

Data History

Esta sección consta de dos partes. La primera es un listado con los valores de las últimas 100 mediciones de corriente o temperatura (según se desee) de cualquiera de los Xbee® estén activos o inactivos.



Figura 3.27 - Página <<Data History>>

La segunda parte es una gráfica en donde se muestran las últimas 30 mediciones, mostrando en el eje x la fecha en la que se realizó la medición y en el eje y el valor de la misma. Se puede elegir si se quiere ver la gráfica de temperatura o de corriente así como el Xbee® del cual se desea ver la información. La gráfica también muestra una línea en el valor máximo establecido por el usuario ya sea de corriente o temperatura y los puntos que se encuentran sobre esta línea se pueden ver identificados con un triángulo, mientras que los valores por debajo de este límite muestran un pequeño círculo.

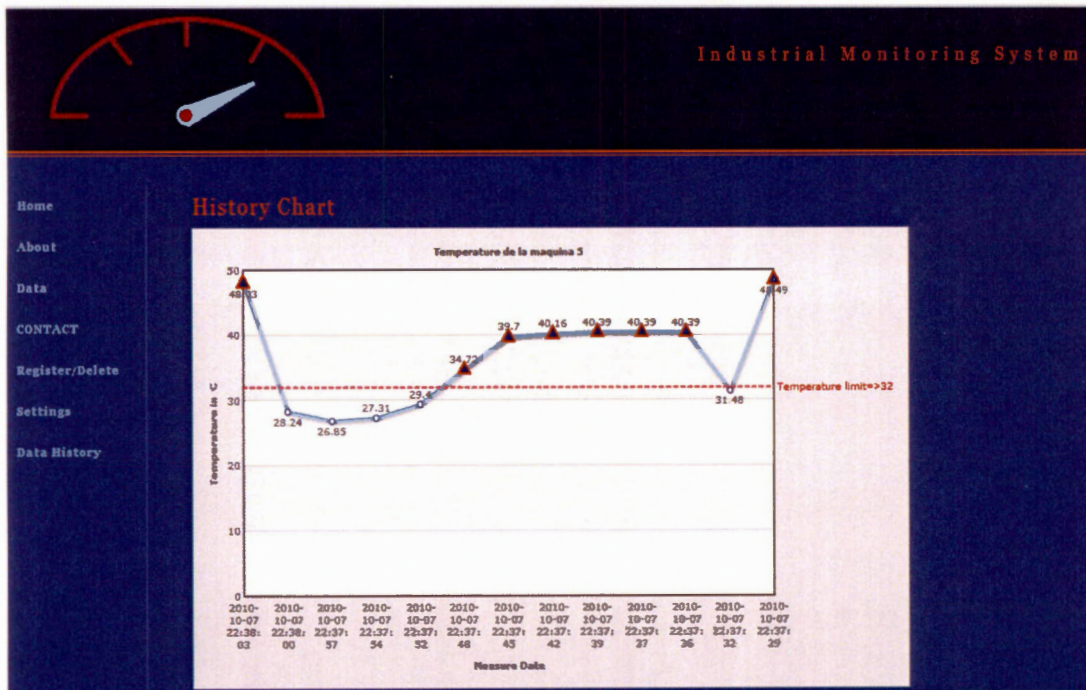


Figura 3.28 - Gráfica de datos de medición

Capítulo 4

Pruebas y resultados

4. Prueba de la red

Se realizaron distintas pruebas para observar el comportamiento real de los módulos Xbee®, tanto del alcance en distintos escenarios, como de distintas topologías de red, asimismo se generó código en el sistema Arduino para monitorear entradas analógicas y digitales, y después un código que mandaba esas mediciones a la red. Las pruebas de alcance y topologías se realizaron en las instalaciones del Tec CCM, las características y resultados de cada prueba se muestran a continuación.

4.1.1 Alcance de Xbee®

Prueba 1

- **Equipo:** 2 Xbee® Pro.
- **Lugar:** Aulas 2 y 3.
 - **Metodología:** Se colocó un módulo afuera del aula magna 5 (aulas 3 primer piso) y otro afuera del aula magna 2 (aulas 2 segundo piso) y se realizó una prueba de alcance.
 - **Resultados:** La comunicación entre los dos módulos fue exitosa y de 1000 elementos enviados, se recibieron todos sin ningún error.

Prueba 2

- **Equipo:** 1 Xbee® Pro y 1 Xbee®.
- **Lugar:** Aulas 2.
 - **Metodología:** Se colocó un módulo dentro del salón 2301 y otro cercano a las escaleras del mismo piso y se realizó una prueba de alcance.
 - **Resultados:** La comunicación entre los dos módulos fue exitosa y de 1000 elementos enviados, se recibieron todos sin ningún error, la distancia aproximada es de 30m.

Prueba 3

- **Equipo:** 2 Xbee® Pro.
- **Lugar:** Biblioteca.
 - **Metodología:** Se colocó un módulo en el 3 piso de la biblioteca y otro estuvo en movimiento por el edificio, se realizaron pruebas de alcance.
 - **Resultados:** La comunicación entre los dos módulos fue exitosa mientras el modulo en movimiento se encontraban alineado verticalmente con el fijo 3 pisos abajo, sin embargo la comunicación se perdía cuando los módulos se encontraban en lugares completamente opuestos con obstáculos de tipo columna, otro tipo de obstáculos no afectaron la comunicación (libreros, paredes de vidrio, paredes delgadas, etc.).

Prueba 4

- **Equipo:** 2 Xbee® Pro.
- **Lugar:** Tec CCM.
 - **Metodología:** Se colocó un módulo afuera de oficinas 5 y otro en movimiento por los espacios abiertos del campus, se realizaron pruebas de alcance.
 - **Resultados:** no se recibieron errores de comunicación hasta el edificio de oficinas I, esta se perdió por completo al colocar el modulo móvil de Xbee® atrás de este edificio, en la figura 1 se muestra el máximo alcance obtenido. La señal tampoco fue exitosa en el interior de Aulas 1, sin embargo apenas se salió de este edificio la comunicación regresó, en Aulas 2 ocurrió lo mismo y en Aulas 3 la señal fue recibida correctamente inclusive adentro del Aula Magna del segundo piso (AM6). Los obstáculos como árboles o postes no afectan mucho a la señal, pero las paredes y las columnas gruesas sí afectan.



Figura 4.1 Alcance de Xbee® Pro con obstáculos.

Las pruebas mencionadas anteriormente se realizaron tanto con los Xbee® Pro con antena de chip como con los de antena de cable y los resultados fueron bastante similares. Los módulos con antena de chip tuvieron una menor recepción pero la diferencia no fue muy grande, por lo general no fueron más de unos 5 metros, por lo que podemos decir que nos convendría más utilizar módulos con antena de chip en los dispositivos en general ya que ocupan un poco menos de espacio y en el caso de routers que vayan a estar fijos podemos utilizar módulos con antenas de cable para que tengan una mejor transmisión y recepción aunque sean solamente unos metros.

Prueba 5

- **Equipo:** 2 Xbee® Pro y 1 Xbee®.
- **Lugar:** Tec CCM.
 - **Metodología:** Se colocó un Xbee® Pro configurado como coordinador afuera de Oficinas V, otro Xbee® Pro configurado como router cerca de Aulas I y Oficinas I (afuera del auditorio en donde se perdió la comunicación en la prueba anterior) y el Xbee® se movió hacia la salida del Tec que se encuentra enfrente del 7 eleven.
 - **Resultados:** La señal se perdió justo llegando a la reja (272 m), es decir se extendió aproximadamente 50 metros más que cuando no se utilizó el router, con lo que pudimos ver que aumentó el alcance de nuestra red al incorporar un router.
 - **Observaciones:** Los resultados fueron los esperados ya que el alcance del Xbee® en interiores o zonas urbanas es de 40m aproximadamente y en este caso fue de aproximadamente 50m, lo cual indica que funcionó correctamente. Además de que comprobamos el alcance del Xbee®, esta prueba fue la primera prueba de una topología de tipo árbol, y aunque solamente tenía una rama pudimos comprobar que efectivamente funciona.



Figura 4.2 Alcance de Xbee® Pro y router con obstáculos.

Prueba en movimiento

- **Equipo:** 2 Xbee® Pro.
- **Lugar:** Estacionamiento del Tec CCM / Periférico.
 - **Metodología:** Ubicamos uno de los equipos Xbee® Pro de chip antena en la planta alta del estacionamiento, en una esquina con vista a periférico. El otro dispositivo Xbee® Pro de *wire antena* lo colocamos en un automóvil, que circuló a diferentes velocidades en periférico.
 - **Resultados:** En esta prueba nos dimos cuenta que la comunicación entre los Xbee® no se ve afectada por el movimiento, ya que el coche llegó a poco más de 90 Km/h a una distancia aproximada 386 metros sin muchos obstáculos (solamente algunos coches y árboles) mostrado en la Figura 3.4.1.2, en las pruebas lo único que nuevamente interfirió en la señal fueron los edificios y el puente.



Figura 4.3 Alcance de Xbee® Pro en movimiento.

4.1.2 Pruebas del sistema Arduino

Una vez que ya se tenía la comunicación entre los nodos funcionando correctamente, se decidió probar un poco el sistema Arduino con el Xbee® Shield y a su vez de las entradas analógicas y digitales de los Xbee®.

- **Equipo:** 1 Arduino Main Board, 1 Xbee® Shield, 1 Xbee® Pro y un Xbee®.
- **Lugar:** Tec CCM.
 - **Metodología:** Se configuró al Xbee® Pro en el modo de coordinador y se colocó sobre el Xbee® Shield. El Xbee® se configuró como dispositivo final y se le conectó un acelerómetro de tres ejes MMA7260Q en tres de sus entradas analógicas, y un push-button en una entrada digital. Se activaron mediante el software X-CTU las entradas del dispositivo final y se modificó el parámetro de tiempo de muestreo para que tome una medición cada 3 segundos. Después se generó un programa en Arduino que se encargaba de recibir los valores leídos por el Xbee® y los enviaba de manera serial a la computadora. Por último se colocó el Xbee® afuera de CEDETEC y el Xbee® Pro afuera de Aulas 3 y se corrió el programa.
 - **Resultados:** El envío de información fue exitoso, se pudo obtener la dirección de 64 bits (SH y SL) del Xbee®, se comprobó que tenía puertos analógicos y digitales activados y se obtuvo el valor de los mismos. El resultado se puede observar en la figura 3.4.2.1.1.
 - **Observaciones:** El envío de información tuvo una velocidad bastante constante, sin embargo en algunos momentos se llegó a atrasar uno o dos segundos.

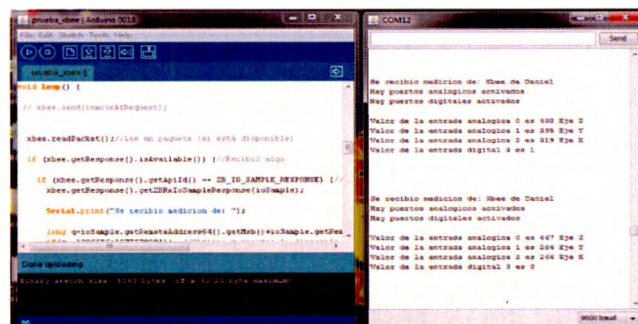


Figura 4.4 Prueba de Arduino.

4.1.3 Prueba de funcionamiento de red

Después de realizar mediciones para comprobar de primera mano el alcance de los equipos se estableció una red compuesta por un coordinador, tres routers y cuatro nodos sensores. Esto cumplió la finalidad de proporcionar conocimiento real y práctico sobre las condiciones que deben considerarse al momento de instalar los equipos y distribuirlos estratégicamente en un campo de aplicación. El lugar de ubicación de esta red de prueba es el ITESM CCM y la siguiente imagen ilustra la disposición de los equipos en el terreno.



Figura 4.5 Mapa de la instalación de la red en el campus.

Coordinador → anaranjado

Router → Verde

Sensor en nodo Xbee® → Amarillo4

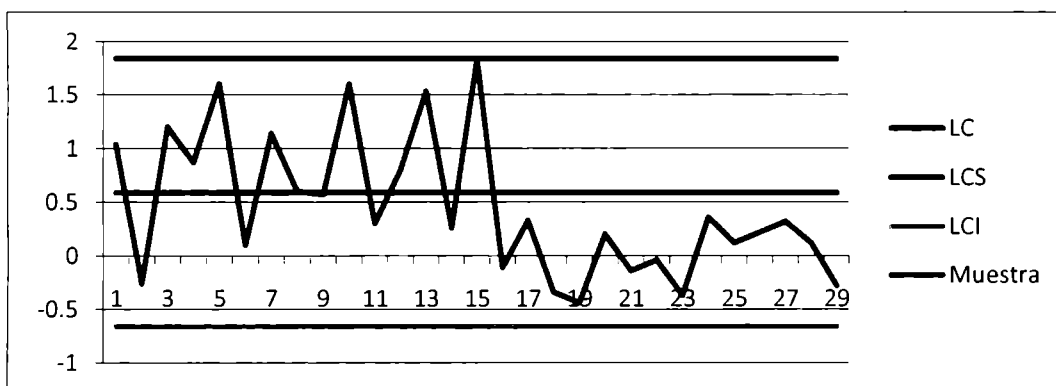
Sensor en nodo Xbee® -PRO → Rojo

4.2 Prueba de los sensores

Para comprobar el adecuado funcionamiento de los sistemas de medición se establecieron límites de control para garantizar un grado aceptable de calidad. Para este efecto se eligió un factor de calidad de 3 sigma de forma que las mediciones pudieran ser confiables aunque no se tenga una alta exactitud en las mediciones. Con este nivel de control en el grado de calidad se garantiza un nivel de cercanía a la realidad en las mediciones más que suficiente para el tipo de aplicaciones que deseamos monitorear.

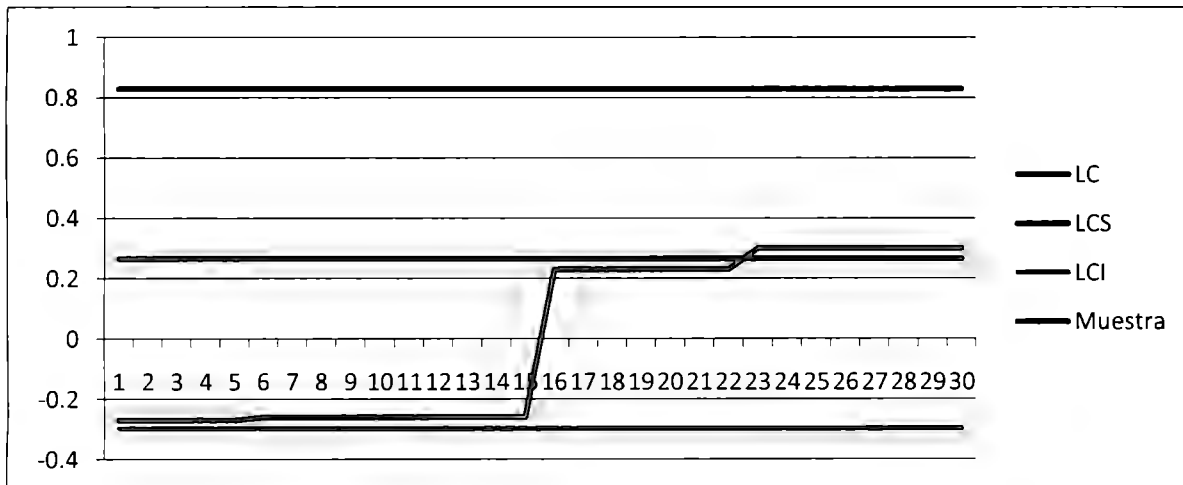
Tanto en el caso del sensor de temperatura como en el caso del sensor de corriente se compararon las mediciones realizadas en el momento con otro equipo que proporcionara alta confiabilidad en las lecturas. Previamente se realizó el calibramiento de los sensores por medio de cálculos para generar el acondicionamiento de la señal y una vez puestos en funcionamiento se hicieron los ajustes necesarios para acercar las lecturas tanto como fuera posible a la realidad.

Para el sensor de temperatura, termopar tipo J, se utilizó paralelamente un termómetro basado también en un termopar pero para aplicaciones de laboratorio. La precisión de este equipo es de $.01^{\circ}\text{C}$, suficiente para calibrar nuestros propios sensores. Es necesario tomar en cuenta la resolución de nuestro sistema de sensado, descrita en el capítulo 3.4, que va directamente relacionado con la conversión de la señal de analógica a digital que se realiza en un ADC de 10bits. Durante la comprobación del funcionamiento del termopar se tomaron treinta mediciones y se generó una gráfica de control que se muestra a continuación.



Gráfica 4.1 Gráfica de pruebas al sensor de temperatura

Posteriormente se realizó la comprobación del sensor de corriente. Se observó que el comportamiento de éste es lineal y por esta razón el acondicionamiento de la señal pudo realizarse con una atenuación de la señal del 10% por medio de un potenciómetro y sin tener que agregar un componente adicional. De igual forma se tomaron treinta mediciones en una misma fuente y se generó la siguiente gráfica que describe el comportamiento de sensor dentro de los límites de control de calidad establecidos en una escala de tres sigma.



Gráficaa 4.2 Gráfica de pruebas al sensor de corriente

4.3 Prueba en la industria

Un aspecto fundamental para comprobar la factibilidad de este proyecto es hacer las mediciones pertinentes en el ambiente donde se quiere utilizar el sistema. De esta forma se inicia la fase de pruebas y comprobación de parámetros de calidad. El lugar escogido para este punto es una imprenta/fábrica donde trabaja con diversos materiales para la producción de empaques. En la planta se encuentra una máquina de grandes dimensiones en la que podemos realizar mediciones y así conocer el comportamiento de la red ante condiciones reales.



Figura 4.6 Fábrica para la realización de pruebas

La siguiente imagen muestra la máquina en la que se realizaron muestras de temperatura.



Figura 4.7 Máquina para medición de temperatura

Para poner a prueba realmente a nuestro sistema hemos decidido colocarlo sobre un motor trabajando para comprobar que el campo electromagnético no intervendrá con el funcionamiento de éste. Así mismo se ha fijado una distancia pertinente para analizar la intensidad de la señal. En las siguientes imágenes se muestra en motor, nuestro circuito en funcionamiento y el área de medición.

Tras haber realizado esta prueba descubrimos que la intensidad de la señal disminuye ya que el Xbee® no fue capaz de transmitir a una distancia de 25m aprox. en un ambiente industrial. Sin embargo, después de instalar un router como intermediario esto se solucionó y la red volvió a funcionar sin problemas. Con el Xbee® Pro la comunicación se logró exitosamente y sin contratiempos.



Figura 4.8 Área de observación, a través de la ventana se muestra la máquina de prueba



Figura 4.9 Motor escogido para la prueba

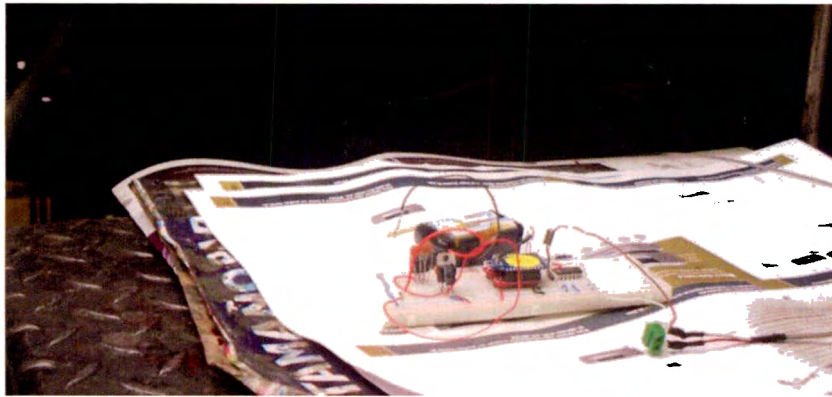


Figura 4.10 Nodo sensor colocado sobre el motor

Luego de experimentar y realizar las pruebas del equipo en distintas situaciones de funcionamiento se obtuvieron los siguientes datos prácticos que nos permitirán analizar las posibles soluciones a un caso dado basándonos en el conocimiento empírico.

- Pruebas punto-punto
 - Alcance Xbee® : 50 m
 - Alcance Xbee® Pro: 220 m
- Pruebas sistema final
 - Alcance Xbee® : 15-40 m
 - Alcance Xbee® Pro: 70-120 m
- Pruebas industria
 - Alcance Xbee® : 30 m con 16% de errores
 - Alcance Xbee® : 15 m sin errores
 - Alcance Xbee® Pro: 30 m sin errores
- Datos del fabricante
 - Ambiente urbano
 - Alcance Xbee® : 40 m
 - Alcance Xbee® Pro: 100 m
 - Sin obstáculos
 - Alcance Xbee® : 100 m
 - Alcance Xbee® Pro: 1600 m

4.5 Análisis energético

Por último se configuraron los Xbee® para tener un tiempo de operación estimado de 3 meses sin cambiar de baterías. Para esto cabe mencionar que en el primer análisis no se tomó en cuenta el consumo de energía por parte de los sensores, lo cual acortaría un poco el tiempo de vida calculado. Para este análisis se eligieron 4 pilas AA que alimentarán a nuestro circuito con una carga de 2500 mAh. Se eligió este tipo de pilas ya que como son utilizadas por cámaras fotográficas no son muy difíciles de conseguir y tampoco son tan caras (12 USD), además de que tienen una vida aproximada de 1000 recargas.

El análisis se hizo de dos formas distintas, la primera fue mediante la página de Digi (fabricante de los Xbee®) en donde eliges los parámetros de tu sistema y te calcula automáticamente las semanas de operación. Con este análisis pudimos ver que si muestreamos cada 4.5 segundos y mientras tanto permanecen dormidos nuestros Xbee®, podemos lograr una vida útil de 18 semanas para el Xbee® y de 13 semanas para el Xbee® Pro.

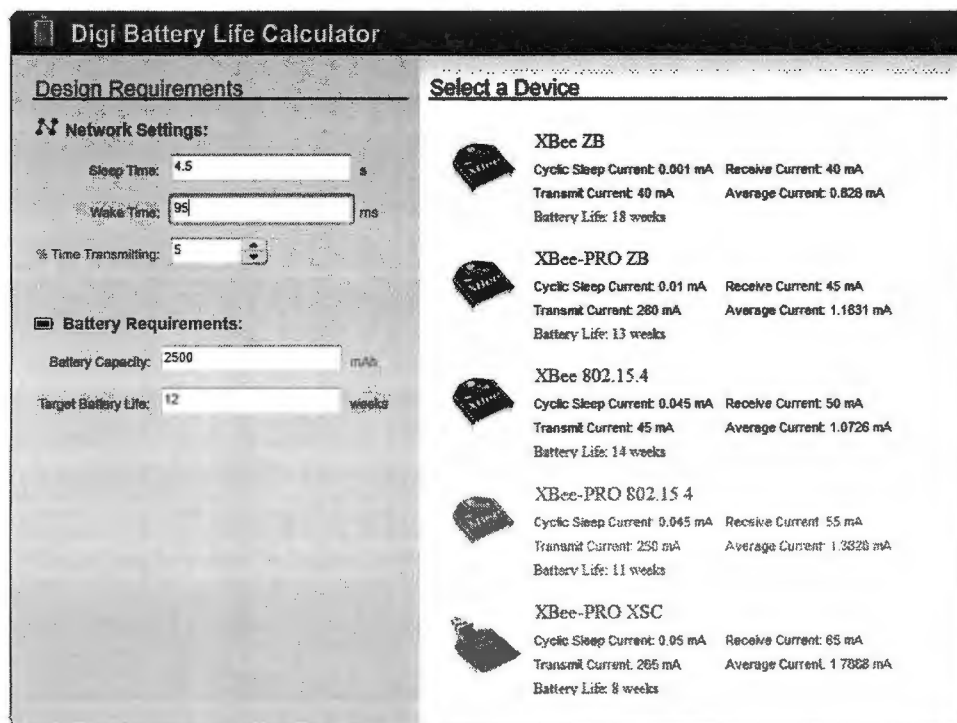


Figura 4.11 Análisis de duración de batería en web

El segundo análisis se hizo utilizando una hoja de Excel en donde hicimos comparaciones entre distintas opciones. Este sistema también ha sido proporcionado por la empresa Digi.

Scenarios		A	B	C	D	E	F
Time	Units	Scenario A	Scenario B	Scenario C	Scenario D	Scenario E	Scenario F
Sleep	s	3	3	4	4	5	5
Idle/Receive	ms	95	95	95	95	95	95
Transmit	ms	5	5	5	5	5	5
Radio type		XBee	XBee	XBee	XBee	XBee	XBee
# of bytes transmitted		32	32	32	32	32	32
Total System Current							
Sleep	mA	0.001	0.01	0.001	0.01	0.001	0.01
Idle/Receive	mA	40	45	40	45	40	45
Transmit	mA	40	280	40	280	40	280
Power usage comparison							
Sleep	%	0.07%	0.53%	0.10%	0.70%	0.12%	0.87%
Idle/Receive	%	84.03%	74.93%	94.91%	74.00%	94.89%	74.67%
Transmit	%	5.00%	24.54%	5.00%	24.50%	4.99%	24.45%
% of scenario A			76%			61%	87%
Average current	mA	1.29129032	1.8403226	0.9765854	1.39390244	0.78529412	1.12254902
Design Goals							
System efficiency		90%	90%	90%	90%	90%	90%
Target battery life	yr	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Required battery capacity	mAh	3144.29	4481.19	2377.99	3384.15	1912.19	2733.41
Given battery capacity	mAh	2500	2500	2500	2500	2500	2500
Estimated battery life	yr	0.20	0.14	0.26	0.18	0.33	0.23

Figura 4.12 Análisis de duración de batería en Excel

Podemos ver que los escenarios A, C y E tienen los mismos consumos de energía en el tiempo de transmisión, recepción y cuando se encuentran dormidos, y lo mismo pasa entre las opciones B, D y F, debido a que las primeras consideran el consumo de un Xbee®, mientras que las segundas el de un Xbee® Pro.

Podemos ver en esta tabla que si muestreamos cada 3 segundos la vida de nuestro Xbee® Pro sería de .14 años o aproximadamente 7 semanas, mientras que muestreando cada 5 segundos se obtienen .23 años o 12 semanas. La diferencia con el análisis mostrado en la página de Digi se debe a que aquí consideramos una

eficiencia del 90% mientras que en la página se considera una eficiencia del 100%. Como vemos si nuestro tiempo de muestreo se encuentra cerca de los 5 segundos, podemos asegurar un tiempo de vida de 3 meses para nuestros Xbee® y Xbee® Pro, sin embargo este análisis no toma en cuenta a los sensores, por lo que aunque este tiempo se podría reducir un poco lo cual nos daría nuevamente un tiempo menor a 3 meses. Para contrarrestar esto se pueden hacer varias cosas. La primera sería utilizar 8 pilas AA, dos paquetes de 4 conectados en paralelo, con lo cual tendríamos 5000 mAh y nuestro tiempo de vida se duplicaría e incluso muestreando cada 3 segundos tendríamos un tiempo de vida de 14 semanas.

La tercera solución que fue la que decidimos implementar fue disminuir el tiempo durante el cual el Xbee® permanece despierto, por lo que cambiamos este tiempo a 45ms y obtuvimos los siguientes resultados.

Scenarios		A	B	C	D	E	F
Time	Units	Scenario_A	Scenario_B	Scenario_C	Scenario_D	Scenario_E	Scenario_F
Sleep	s	3	3	4	4	5	5
Idle/Receive	ms	45	45	45	45	45	45
Transmit	ms	5	5	5	5	5	5
Radio type		XBee	XBee	XBee	XBee	XBee	XBee
# of bytes transmitted		32	32	32	32	32	32
Total System Current							
Sleep	mA	0.001	0.01	0.001	0.01	0.001	0.01
Idle/Receive	mA	40	45	40	45	40	45
Transmit	mA	40	280	40	280	40	280
Power usage comparison							
Sleep	%	0.15%	0.87%	0.20%	1.15%	0.25%	1.44%
Idle/Receive	%	89.87%	58.51%	89.82%	58.44%	89.73%	58.27%
Transmit	%	9.98%	40.62%	9.98%	40.40%	9.98%	40.29%
% of scenario A			75%			60%	
Average current	mA	0.65672131	1.1327869	0.4948148	0.25555556	0.3970297	0.68811881
Design Goals							
System efficiency		90%	90%	90%	90%	90%	90%
Target battery life	yr	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Required battery capacity	mAh	1599.12	2758.34	1204.87	2083.28	966.77	1575.57
Given battery capacity	mAh	2500	2500	2500	2500	2500	2500
Estimated battery life	yr	0.39	0.23	0.52	0.30	0.65	0.37

Figura 4.13 Análisis en Excel con las nuevas baterías

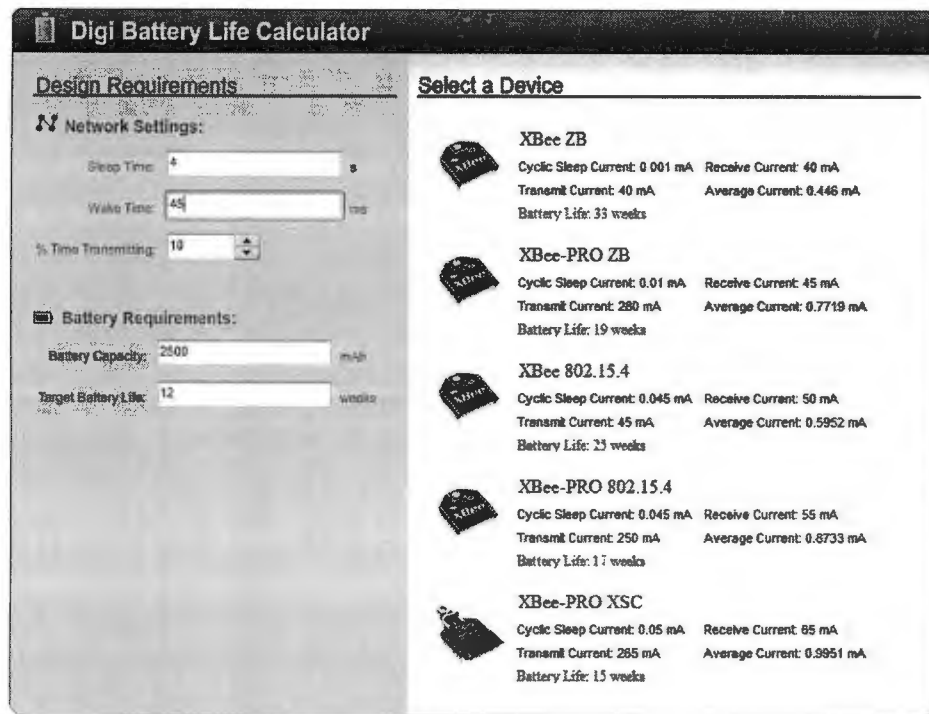


Figura 4.14 Análisis en web con las nuevas baterías

Con estos nuevos resultados pudimos observar que si muestreamos cada 4 segundos podemos lograr un tiempo de vida mayor a los 3 meses, lo cual nos da oportunidad para agregar los sensores y aun así tener una vida de 3 meses. Por último se configuraron los Xbee® para probar que el sistema funcionara cambiando los parámetros del modo "sleep" a los valores que se muestran a continuación.

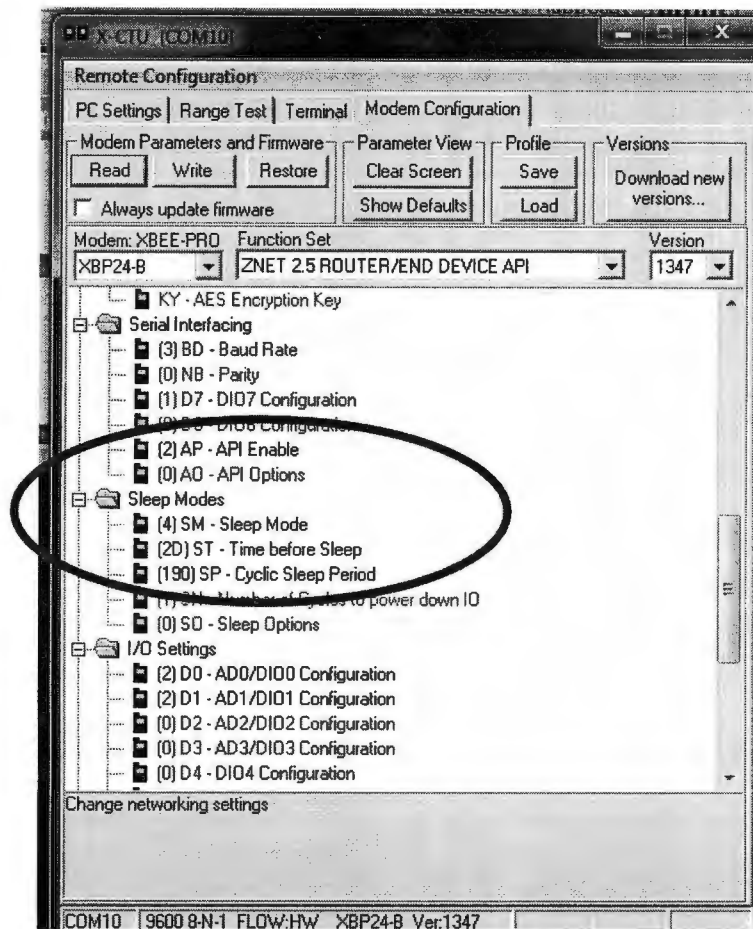


Figura 4.15 Ajuste de parámetros de funcionamiento

Para comprobar que el sistema funcionara con los tiempos dados se conectaron 5 Xbee® a un coordinador y se observó que el muestreo se hiciera efectivamente cada 4 segundos y que no se saltara ninguna medición, lo cual funcionó correctamente como se puede ver en los tiempos de la gráfica obtenida los cuales están separados por 4 segundos, con excepción de uno que se encuentra separado por 5 segundos.

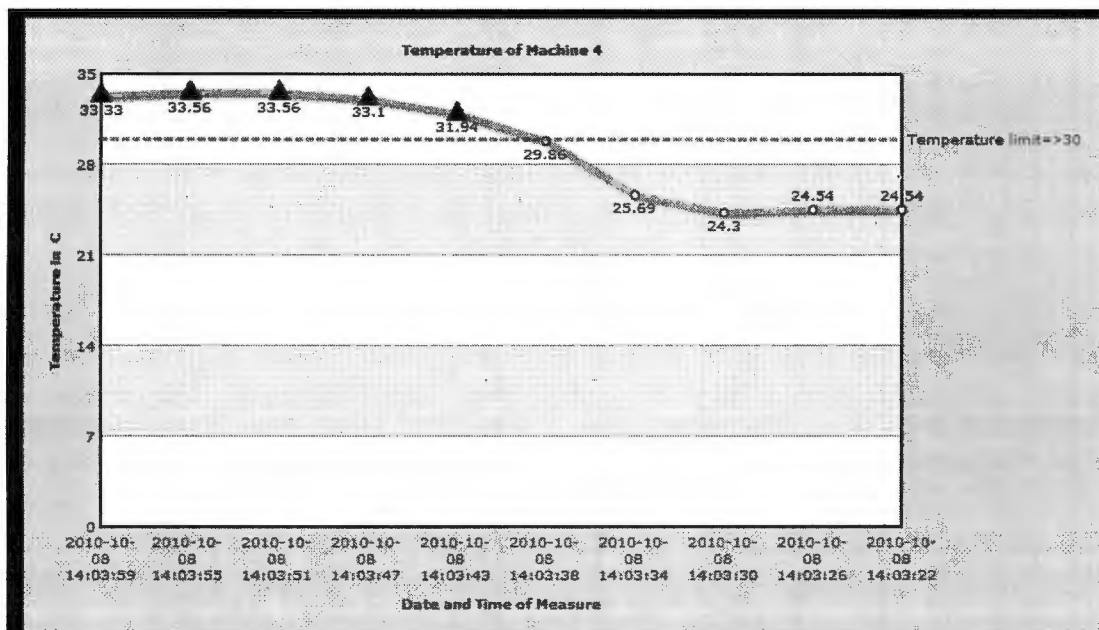


Figura 4.16 – Captura de datos con nuevo periodo de muestreo

Cabe mencionar que los 45 ms no se escogieron arbitrariamente, sino que utilizando el sistema completo (sensores, coordinador y el sitio web) se probó con distintos tiempos y resultó que 45 ms era el menor tiempo con el cual el sistema funcionaba sin errores.

Otro punto importante es que para el análisis de las semanas de vida se consideró que los Xbee® se encuentran operando 24/7, lo cual no va a suceder en la realidad, por lo tanto si tomamos que trabajan 10 horas al día y 6 días a la semana, para el caso del Xbee® Pro con un muestreo cada 4 segundos tenemos los siguientes resultados.

Corriente promedio = .855 mA

Capacidad de las baterías = 2500 mAh

Horas de operación al día = 10 h

Días de operación a la semana = 6

$$\text{horas de vida} = \frac{\text{capacidad de la batería}}{\text{corriente promedio}} = \frac{2500\text{mAh}}{.8555\text{mA}} = 2922.07 \text{ h}$$

$$\text{Semanas de vida} = 2922.07 \text{ hrs} \left(\frac{1 \text{ día}}{10 \text{ hrs}} \right) \left(\frac{1 \text{ semana}}{6 \text{ días}} \right) = 48 \text{ semanas}$$

Para el Xbee®.

$$\text{horas de vida} = \frac{\text{capacidad de la batería}}{\text{corriente promedio}} = \frac{2500\text{mAh}}{.4948148\text{mA}} = 5052.39 \text{ h}$$

$$\text{Semanas de vida} = 5052.39 \text{ hrs} \left(\frac{1 \text{ día}}{10 \text{ hrs}} \right) \left(\frac{1 \text{ semana}}{6 \text{ días}} \right) = 84 \text{ semanas}$$

Si ahora observamos la hoja de especificaciones del circuito integrado AD594 el cual se encarga de transformar la señal del termopar a una señal lineal de 10mV/°C podemos ver que tiene un consumo aproximado de 160 µA. Ahora agregamos a la corriente consumida este valor.

El AD594/AD595 puede ser alimentado por una fuente única (incluyendo +5V) e incluyendo una alimentación negativa se pueden medir temperaturas por debajo de los 0°C. Para disminuir el calentamiento, un AD594/AD595 operará típicamente con una corriente total de 160µA, pero será capaz de proporcionar en exceso de ±5mA a la carga.

Tabla 4.1 - Indicaciones para el uso del AD594

Para el caso en el que operan 24 horas durante los 7 días de la semana.

Para el Xbee® Pro.

$$\text{horas de vida} = \frac{\text{capacidad de la batería}}{\text{corriente promedio}} = \frac{2500\text{mAh}}{1.015556\text{mA}} = 2461.7 \text{ h}$$

$$\text{Semanas de vida} = 2461.7 \text{ hrs} \left(\frac{1 \text{ día}}{24 \text{ hrs}} \right) \left(\frac{1 \text{ semana}}{7 \text{ días}} \right) = 14 \text{ semanas}$$

Para el Xbee®.

$$\text{horas de vida} = \frac{\text{capacidad de la batería}}{\text{corriente promedio}} = \frac{2500\text{mAh}}{.6548148\text{mA}} = 3817.87 \text{ h}$$

$$\text{Semanas de vida} = 3817.87 \text{ hrs} \left(\frac{1 \text{ día}}{24 \text{ hrs}} \right) \left(\frac{1 \text{ semana}}{7 \text{ días}} \right) = 22 \text{ semanas}$$

Para el caso en el que operan 10 horas durante 6 días a la semana.

Para el Xbee® Pro.

$$\text{horas de vida} = \frac{\text{capacidad de la batería}}{\text{corriente promedio}} = \frac{2500\text{mAh}}{1.015556\text{mA}} = 2461.7 \text{ h}$$

$$\text{Semanas de vida} = 2461.7 \text{ hrs} \left(\frac{1 \text{ día}}{10 \text{ hrs}} \right) \left(\frac{1 \text{ semana}}{6 \text{ días}} \right) = 41 \text{ semanas}$$

Para el Xbee®.

$$\text{horas de vida} = \frac{\text{capacidad de la batería}}{\text{corriente promedio}} = \frac{2500\text{mAh}}{.6548148\text{mA}} = 3817.87 \text{ h}$$

$$\text{Semanas de vida} = 3817.87 \text{ hrs} \left(\frac{1 \text{ día}}{10 \text{ hrs}} \right) \left(\frac{1 \text{ semana}}{6 \text{ días}} \right) = 63 \text{ semanas}$$

Podemos ver que si los Xbee® se mantienen encendidos todo el tiempo, incluso cuando la industria se encuentra cerrada, tanto la versión normal como la Pro pueden funcionar con el paquete de pilas durante más de 3 meses, mientras que si se apagan cuando no se usen su tiempo de vida aumenta considerablemente a casi 10 meses para la versión Pro y casi 15 meses para la versión normal.

Capítulo 5

Conclusiones

Al finalizar el desarrollo y pruebas de este proyecto pudimos observar distintas características importantes de la tecnología ZigBee®. Una de las más importantes y que tiene gran relevancia para la factibilidad de este proyecto es la confiabilidad de las redes inalámbricas que se establecen bajo un esquema del estándar IEEE 802.15.4. El principal factor a considerar y revisar para lograr dicha confiabilidad es la configuración de la red como tal, es decir, debe hacerse una ubicación adecuada de los nodos. Esto debe hacerse de forma física mientras se observa la calidad de la señal y la cantidad de errores que se generan con una u otra configuración. Este aspecto debe desarrollarse como una habilidad práctica.

Considerando la conectividad con dispositivos adicionales como sensores y actuadores se ha observado una gran flexibilidad por parte de esta tecnología. Uno de los objetivos fue integrar sensores para poder monitorear variables en un sistema y esto no siempre puede hacerse por medio de equipos digitales. Los nodos Xbee® tienen la capacidad de trabajar con dispositivos tanto analógicos como digitales y esto permite ampliar la gama de accesorios complementarios a implementar en nuestra red inalámbrica.

Considerando las limitaciones de espacio en muchas de las áreas de aplicación dentro de la industria, como los motores y maquinaria en general, se requieren equipo de pequeñas dimensiones si se les quiere monitorear. Este aspecto se cubre con los nodos que además de integrarse en pequeñas dimensiones pueden adaptarse fácilmente a las condiciones requeridas en los diferentes escenarios. Por consiguiente su implementación se logra sin grandes complicaciones.

Cuando se habla de confiabilidad en redes de información debe entenderse la importancia de la redundancia de estas. Para cumplir con este factor la ubicación de routers en el área de trabajo es fundamental. Debido a las características de la tecnología es posible la solución de problemas momentáneos en la comunicación entre los nodos. En ocasiones puede ocurrir que si existe un nodo funcionando erróneamente se pierda la comunicación de la red, pero con la conexión automática

entre nodos finales y routers esto se resuelve oportunamente y sin necesidad de que un experto tome acción.

Por último, se debe tomar en cuenta el consumo de energía por parte de estos dispositivos. Durante el desarrollo del proyecto se observó un bajo consumo de energía y para conocer más al respecto se consultaron los datos proporcionados por el fabricante. Tomando en cuenta los datos teóricos y los resultados obtenidos a través de la experiencia podemos decir que el consumo es bajo en estos dispositivos incluso incluyendo componentes complementarios ya sea para el funcionamiento de los sensores o como en este caso una señal por medio de un diodo LED

Trabajo a futuro

Para mejorar y seguir desarrollando las capacidades del sistema deben realizarse algunos esfuerzos y análisis adicionales. En primer lugar debe hacerse un estudio completo del consumo de energía. Para esto se establecerán patrones de uso similares a los de la industria en la que se han hecho pruebas anteriormente. Posteriormente se seleccionarán baterías convenientes para tomarlos como referencia y poder observar cuanto tiempo dura la carga de estos elementos. Este análisis requiere de un periodo de tiempo más prolongado para poder realizarlo, por esta razón no se ha podido agregar en este reporte.

Será pertinente agregar sistemas de seguridad para el sitio web y la base de datos en la que se almacenará la información del monitoreo. En este sentido se desea evitar que personal no autorizado tenga la capacidad de acceder a los datos del equipo. De igual forma debe garantizarse que la información almacenada no pueda ser modificada y que en cualquier momento se pueda tener acceso a ella.

Finalmente, resta pensar en la inclusión de actuadores a nuestra red inalámbrica de modo que no sólo sea capaz de monitorear los equipos industriales sino que en caso de surgir un inconveniente y no haya respuesta por parte de los encargados se produzca una señal que desactive el equipo y evite daños severos. Este aspecto no resulta mayormente difícil y sabemos que la tecnología nos permite realizar estas modificaciones. En este sentido podremos pensar en la red como un sistema de monitoreo y prevención de daños en el equipo.

Bibliografía

- [1] M. Kuorilehto *et al.* *Ultra-Low Energy Wireless Sensor Networks in Practice*. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2007. p. 4.
- [2] Wikipedia (2010, Febrero 17) "*Wireless Network*" [En línea]. Disponible en: http://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_network
- [3] Wikipedia (2010, Febrero 17) "Historia de la Aviación" [En línea]. Disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/Historia_de_la_aviación
- [4] *Encyclopædia Britannica*. (2010, Febrero 17). "*Satellite communication*" [En línea]. Disponible en: <http://0-search.eb.com.millennium.itesm.mx/eb/article-9065845>
- [5] Digiteen (2010, Febrero 20) "Access and Innovation" [En línea]. Disponible en: http://digiteen09-2.flatclassroomproject.org/Access_Innovation
- [6] Bradley Mitchell (2010, Febrero 22) "*Protocol (network)*" [En línea]. Disponible en: <http://compnetworking.about.com/od/networkprotocols/g/protocols.htm>
- [7] Answers.com (2010, Febrero 20) "ZigBee®" [En línea]. Disponible en: <http://www.answers.com/topic/ZigBee®>
- [8] Daintree Networks (2010, Febrero 25) "*Getting Started With ZigBee® and IEEE 802.15.4*" [En línea]. Disponible en: http://www.daintree.net/downloads/whitepapers/ZigBee®_primer.pdf?04689c51410dea3ab5cc32b2b01c7ae7=dfd7f27195b47225be66e77a3e219ca2 p. 23.
- [9] Solid State Supplies (2010, Febrero 20) "Xbee® PRO Series 2" [En línea]. Disponible en: http://www.sssplc.com/store/wireless-oem-modules/-ZigBee®/xbp24-z7uit-004-Xbee®-pro-series-2-ZigBee®-pro-stack-2-4ghz-rf-module/prod_128.html
- [10] Aula clic (2010, Febrero 20) "WiFi" [En línea]. Disponible en: <http://www.aulaclic.es/articulos/wifi.html>
- [11] Wikipedia (2010, Febrero 24) "Bluetooth" [En línea]. Disponible en: <http://es.wikipedia.org/wiki/Bluetooth>
- [12] Wikipedia (2010, Febrero 24) "RFID" [En línea]. Disponible en: <http://es.wikipedia.org/wiki/RFID>
- [13] B. Warneke, M. Last, B. Liebowitz, K.S.J. Pister, "*Smart Dust: communicating with a cubic-millimeter computer*," IEEE Computer, vol. 34, no. 1, pp. 44-51, Agosto 2002.
- [14] J. M. Kahn, R. H.Katz, K.S.J. Pister, "*Emerging Challenges: Mobile Networking for "Smart Dust"*," Journal Of Communication and Networks, pp. 188-196, Septiembre 2000.
- [15] CCNA Exploration Network Fundamentals, *Communicating Over the Network*, Cisco Network Academy, 2010.

[16] "Tipos de redes", notas de clase de Redes I (TC 1007), Departamento de Computación, ITESM CCM, Enero 2010.

[17] CCNA Exploration Network Fundamentals, *Data Link Layer*, Cisco Network Academy, 2010.

[18] Wikipedia (2010, Febrero 17) "ZigBee®" [En línea]. Disponible en: <http://en.wikipedia.org/wiki/ZigBee®>

[19] Daintree Networks (2010, Febrero 25) "Getting Started With ZigBee® and IEEE 802.15.4" [En línea]. Disponible en: http://www.daintree.net/downloads/whitepapers/ZigBee®_primer.pdf?04689c51410dea3ab5c32b2b01c7ae7=fd7f727195b47225be66e77a3e219ca2 p. 10.

[20] Digi (2010, Febrero 25) "Xbee® & Xbee® -PRO® ZB ZigBee® PRO RF Modules" [En línea]. Disponible en: <http://www.digi.com/products/wireless/ZigBee®-mesh/Xbee®-zb-module.jsp#overview>

[21] Crossbow (2010, Febrero 25) "MicaZ 2.4GHz" [En línea]. Disponible en: <http://www.xbow.com/Products/productdetails.aspx?sid=164>

[22] Sun Labs (2010, Febrero 25) "SunSpot" [En línea]. Disponible en: <http://www.sunspotworld.com/>

[23] Contiki (2010, Febrero 24) "Two New Contiki Ports: MicaZ and Sensinode" [En línea]. Disponible en: <http://www.sics.se/contiki/news/two-new-contiki-ports-micaz-and-sensinode.html>

[24] Osum (2010, Febrero 24) "Sun SPOT: Small Programmable Object Technology" [En línea]. Disponible en: <http://osum.sun.com/events/event/show?id=2181626:Event:459441>

[25] Digi (2010, Febrero 24) "Xbee® y Xbee® PRO" [En línea]. Disponible en: <http://www.digi.com/products/wireless/ZigBee®-mesh/Xbee®-zb-module.jsp>

[26] Coelvi. "Xbee – Xbee PRO" [En línea]. Disponible en: <http://www.coelvi.com/catalog/xbee-xbee-p-293.html>

[27] ZigBee® Alliance. "*Awarepoint with ZigBee® improve Patient Care and the Bottom Line.*" Success Story, 2009.

[28] ZigBee® Alliance. "*TimeLox AB with ZigBee®; Increasing Hotel Security Worldwide.*" Success Story, 2009.

[29] ZigBee® Alliance. "*Telegesis and ZigBee® Get Into Hot Water.*" Success Story, 2009.

[30] ZigBee® Alliance. "*CityGrow with ZigBee®; Energy Efficient Buildings of the Future, Now.*" Success Story, 2009.

[31] ZigBee® Alliance. "*Siemens With ZigBee®; Driving Volvo Towards the Future.*" Success

Story, 2009.

[32] ZigBee® Alliance. "*Green Peak Technologies and ZigBee®: Harvesting Power In the Wireless Greenhouse of the Future.*" Success Story, 2009.

[33] ZigBee® Alliance. "*Light Corporation and ZigBee®: The Future of Lighting and Workspace Management Today.*" Success Story, 2009.

[34] ZigBee® Alliance. "*AMX Delivers "Instant-On" Home Automation.*" Success Story, 2009.

[35] ZigBee® Alliance. "*Landis+Gyr and ZigBee® Advanced Metering for the intelligent Electric Grid.*" Success Story, 2009.

[36] Xbee® - Xbee® PRO Datasheet

[37] SparkFun Electronics "Arduino Main Board" [Enlínea]. Disponible en:
<http://www.sparkfun.com/products/666>

[38] SparkFun Electronics "Arduino LilyPad" [Enlínea]. Disponible en:
<http://www.sparkfun.com/products/9266>

[39] SparkFun Electronics "Arduino Fio" [Enlínea]. Disponible en:
<http://www.sparkfun.com/products/9712>

[40] SparkFun Electronics "Xbee Shield" [Enlínea]. Disponible en:
<http://www.sparkfun.com/products/9588>

[41] SparkFun Electronics "Arduino Ethernet Shield" [Enlínea]. Disponible en:
<http://www.sparkfun.com/products/9026>



SISTEMA DE MONITOREO INDUSTRIAL UTILIZANDO TECNOLOGÍA ZIGBEE®

AUTORES

Daniel Chaparro A01124656
Fernanda Galicia A01105887
Ignacio Narvaez A00996269

ASESOR

Dr. Raúl Crespo

Campus Ciudad de México
Noviembre, 2010

PROBLEMÁTICA

Actualmente las empresas tienen una respuesta tardía ante problemas por falta de monitoreo remoto y las redes cableadas para este propósito presentan dificultad de instalación, altos costos y poca escalabilidad.

OBJETIVO GENERAL

Generar una red sensorial inalámbrica IEEE 802.15.4 que sea capaz de medir la corriente consumida por un motor, la temperatura del mismo y mandar esa información a una base de datos en internet.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar pruebas de alcance y comunicación con distintas topologías de red en los nodos.
- Integrar sensores a la red, comprobar su funcionamiento y almacenar las mediciones en una base de datos que se comuniquen a internet.
- Diseñar un sitio web que despliegue gráficas/alertas/tablas dependiendo de las mediciones de la red de sensores.

DESARROLLO

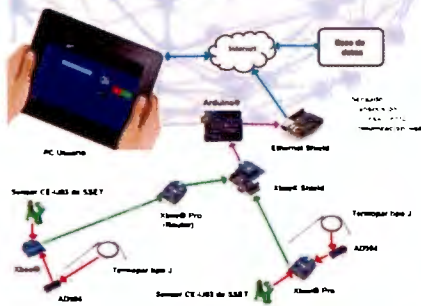
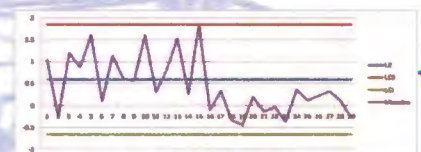


Figura 1. Sistema implementado



Gráfica 1. Calidad sensor corriente



Gráfica 2. Calidad sensor de temperatura

- En las gráficas 1 y 2 se muestra la variabilidad de las mediciones del sistema contra las dadas por un multímetro de uso industrial, la cual se encuentra dentro de los límites de control en un rango de 3σ por lo que la calidad es aceptada.

RESULTADOS

Tabla 1. Pruebas de comunicación		
	Xbee®	Xbee - PRO®
Ambiente urbano*	40m	100m
Sin obstáculos*	100m	1600m
Punto - punto	50m	220m
Sistema final	15-40m	70-120m
Industria	15m 30m con 16% de errores	30m

*Datos proporcionados por el fabricante

CONCLUSIONES

- Sistema de alta confiabilidad utilizando una configuración de red adecuada.
- Flexibilidad al implementar dispositivos complementarios analógicos y digitales.
- Nodos requieren poco espacio de instalación.
- Posible bajo consumo de energía.
- Fácil diseño e implementación de la red.
- Problemas en un nodo pueden desconectar la red por unos instantes.
- Redundancia de la red gracias a la conexión automática a routers cercanos.

TRABAJO A FUTURO

- Realizar pruebas del consumo de energía del sistema.
- Implementar seguridad para el acceso a la página web.
- Integrar actuadores a la red para controlar el sistema monitoreado.
- Diseñar circuitos impresos para los nodos y el coordinador.