



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**SISTEMA DE COMUNICACIÓN
INALÁMBRICA (ZIGBEE) PARA LOS
MEDIDORES DIGITALES DE ENERGÍA
ELÉCTRICA**

INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES

Que para obtener el título de

INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

P R E S E N T A

Abraham Solano Carrasco

ASESOR DE INFORME

Dr. Jorge Rodríguez Cuevas



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	2
ACERCA DE LA EMPRESA EN LA QUE SE LABORA	3
1. MARCO TEÓRICO	5
1.1. Acerca de las redes de sensores inalámbricos o Wireless Sensor Networks (WSN)	5
1.2. ¿Qué es una red de sensores inalámbricos o Wireless Sensor Networks (WSN)?.....	6
1.3. Características de las redes de sensores inalámbricas.....	6
1.3.1. Ruteo dinámico	6
1.3.2. Bajo costo de mantenimiento.....	7
1.3.3. Baja latencia para aplicaciones críticas.	7
1.3.5. Sistema portable y flexible.....	8
1.4. Algunas aplicaciones potenciales de las WSN.	8
1.5. Arquitectura del sistema WSN y protocolos de comunicación inalámbrica.	8
1.6. Nodo inalámbrico.....	9
1.7. Componentes de un nodo sensor	9
1.8. Optimización del consumo de energía.....	10
1.9. Tecnología ZigBee.....	11
1.9.1. ¿Qué es ZigBee?	11
1.9.2. Redes ZigBee.....	12
1.9.3. Estructura y Limitaciones de los Radios que soportan ZigBee.....	13
2. ANTECEDENTES	14
3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	14
4. DESARROLLO DEL PROYECTO	15
4.1. Fase 1: Elección del módulo de comunicación ZigBee.....	15
4.2. Fase 2: Código fuente	17
4.2.1. Firmware Colector programable.....	17
4.2.2. Firmware Remoto programable	20
4.3. Fase 3: Integración tecnológica	23
4.3.1. Desarrollo de tarjeta electrónica	24
4.4. Fase 4: Arquitectura.....	26
4.4.1. Arquitectura del sistema.....	26



4.4.2.	Componentes sistema.....	28
4.4.3.	Trafico.....	30
4.4.4.	Administración de redes.....	31
4.5.	Fase 5: Ensamble e integración	33
4.5.1.	Estación 1 Desarmado De Medidores:.....	33
4.5.2.	Estación 2 y 3 Estación de soldadura:.....	33
4.5.3.	Estación 4 Instalación de radio:.....	34
4.5.4.	Estación 5 Armado de Medidores:.....	34
4.5.5.	Estación 6 Pruebas (tableros):.....	34
4.5.6.	Estación 7 Sellado y Escaneado:.....	35
4.5.7.	Estación 8 Emplaye:	35
5.	RESULTADOS Y APORTACIONES	35
5.1.	Asimilación tecnológica a nivel personal (certificaciones)	35
5.2.	Capacitación al personal de la empresa proveedora del servicio de energía eléctrica. (Taller “Radios Digi® XBee / Protocolo ZigBee”)	36
5.3.	Pruebas de laboratorio en UTEC CFE lechería (Universidad Tecnológica).....	36
5.4.	Pruebas en campo con 1000 nodos remotos (Los Encinos, Zumpango de Ocampo, Estado de México.).....	37
5.5.	Validación del proyecto por parte de fabricante del radio XBee y de la empresa desarrolladora del proyecto.	40
5.6.	Implementación piloto del sistema con 180 000 nodos remotos (Atizapán, Ciudad Azteca, Basilica, Ecatepec, Naucalpan, Tlalnepantla).....	40
	CONCLUSIONES	41
	REFERENCIAS.....	42
	GLOSARIO	43



INTRODUCCIÓN

Hoy en día las redes inalámbricas de sensores son una solución factible a problemas de gran importancia en el área de ingeniería, debido a esto sus requerimientos son cada vez más exigentes. Una de las áreas de aplicación que ha tomado fuerza, es la de los sistemas de medición avanzada, medidores de agua, luz y gas.

En este sentido, el presente proyecto consiste en el desarrollo de un sistema de múltiples redes ZigBee, el cual pretende proveer de conectividad inalámbrica a los medidores de energía eléctrica actualmente operativos con la finalidad primordial de garantizar una medición precisa del consumo de energía del usuario, asimismo ayudar a reducir el robo de energía y dar la capacidad de lectura, corte y reconexión remota desde el sistema comercial de la compañía prestadora del servicio eléctrico en México.

Actualmente existe una infraestructura de medidores de energía eléctrica en México conocidos como *medidores electrónicos*, capaces de medir, registrar y almacenar información mediante un microcontrolador. A estos medidores se les agregó la capacidad de conectarse de forma inalámbrica entre ellos y con los concentradores formando una red inalámbrica de sensores también conocida por su acrónimo en inglés como *Wireless Sensor Network (WSN)* que permite transmitir los datos de consumo de energía en tiempo real al sistema de facturación de la empresa proveedora del servicio eléctrico, incluyendo la posibilidad de administrar el corte y la reconexión en forma remota.

La implementación piloto de este sistema gestiona 180,000 nodos remotos con lecturas diarias de sus medidores eléctricos.



OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un sistema de múltiples redes ZigBee con la finalidad de agregarle conectividad inalámbrica a los medidores de energía eléctrica actualmente operativos en México.

OBJETIVOS PARTICULARES PARA LA RED

- Desarrollar una red ZigBee autoconfigurable que tenga la capacidad de auto mantenerse, que al agregar un nodo más a la red de sensores sea identificado, configurado e integrado por el coordinador para así luego informar al resto de la red de la existencia de este.
- Lograr que el tiempo de vida de la red de sensores inalámbrica sea lo más extensa posible de manera que no sea necesario después de que el sistema está instalado y funcionando la intervención humana, es decir, que funcione sin problemas de conexión entre nodos y sin fallas en la retransmisión y ruteo de paquetes.
- Lograr que la red de sensores inalámbrica sea robusta, es decir, que el dato que se mide y transmite es el dato que se recibe en el nodo final sin pérdida de información.
- Lograr que el tiempo de latencia sea pequeño, es decir, que el tiempo desde que se mide un dato hasta que se transmite a la red tenga una baja tasa de error y una alta velocidad de respuesta.
- La red de sensores inalámbrica deberá abarcar zonas de gran extensión sin importar el lugar en donde haya sido implementada.

OBJETIVOS PARTICULARES PARA EL CLIENTE

- Garantizar la medición precisa del consumo de energía del usuario tomando la lectura de manera remota eliminando así la intervención humana.
- Reducir pérdidas de energía no técnicas, que es la energía que se pierde en el sistema eléctrico por usos ilícitos, robo de electricidad, errores de medición o de facturación.
- Dar la capacidad de corte y reconexión remota, mejorando así los niveles de servicio a los usuarios.



ACERCA DE LA EMPRESA EN LA QUE SE LABORA

HISTORIA

Esta empresa se constituyó con la finalidad de atender las necesidades de la industria, mediante la venta y distribución de equipo y materiales electrónicos, en el mantenimiento de equipo industrial y la integración de sistemas para el control de procesos industriales, con apoyo encaminado al reforzamiento de las necesidades del cliente que no cuenta con la tecnología, o con el conocimiento, ni de los recursos humanos capacitados para estos fines. Fue fundada en 1983, en el estado de Tamaulipas, aunque fue hasta el año de 1992 cuando se constituyó como la sociedad anónima de capital variable, con el número de escritura pública en la que consta el acta constitutiva 1154, de fecha del 14 de marzo de 1992. [1]

MISIÓN

Comercializar y brindar asesoría en componentes innovadores de calidad, para cubrir las necesidades de diseño y mantenimiento, dentro de un ambiente que promueve la mejora y el desarrollo continuo. [2]

VISIÓN

Para el año 2020 se pretende:

- Ser uno de los mejores proveedores en componentes innovadores.
- Extender sus operaciones a otras regiones dentro y fuera del territorio nacional.
- Contar con una planta de fabricación de productos innovadores.

POLÍTICA DE CALIDAD

Trabajar para satisfacer los requisitos de los clientes en variedad, calidad y tiempo de entrega, proporcionándoles un servicio profesional en la comercialización de componentes innovadores, cumpliendo con un SGC ISO 9001:2008 orientados hacia la mejora continua. [2]

FUNCIONES DESEMPEÑADAS EN LA EMPRESA

ORGANIGRAMA DE LA ORGANIZACIÓN

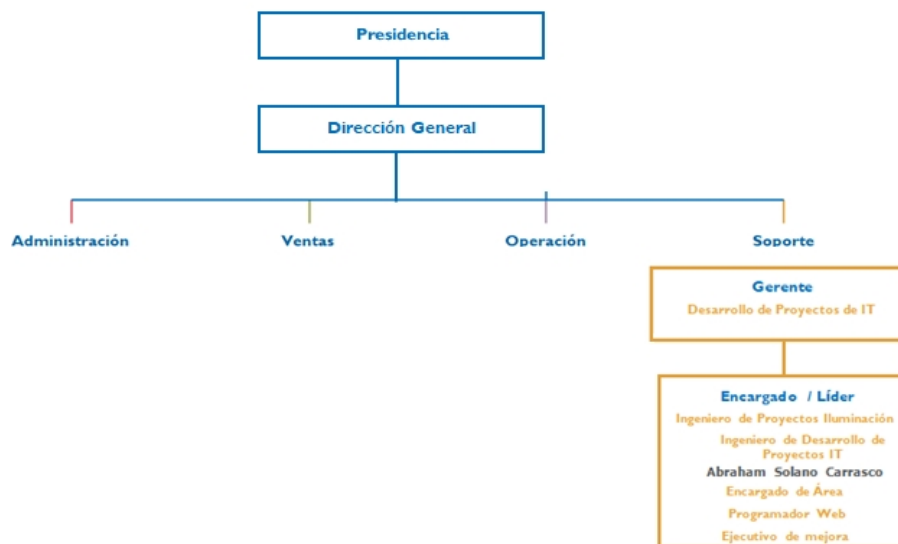


Fig. 1: Organigrama de la empresa en donde se labora. Fuente: elaboración propia.



ÁREA EN DONDE SE DESEMPEÑA EL PUESTO: DESARROLLO DE PROYECTOS IT

El área de desarrollo de proyectos IT es una división que tiene el compromiso de impulsar el desarrollo tecnológico del país. De aquí que nuestros esfuerzos estén enfocados a consolidar relaciones con clientes de cualquier sector relacionado con la electrónica.

PUESTO DE TRABAJO

Ingeniero especialista en la integración de tecnologías, diseño de hardware y desarrollo de software para la implementación de soluciones en telemetría y control.



1. MARCO TEÓRICO

1.1. Acerca de las redes de sensores inalámbricos o Wireless Sensor Networks (WSN)

En 1997 el Instituto de Ingenieros eléctricos y electrónicos (IEEE) desarrolla el estándar 802.11 o WLAN el cual tiene una gran tasa de transferencia de datos que alcanza aproximadamente 2 [Mbps]. Actualmente en el mercado los protocolos de comunicación inalámbrica más populares son el 802.11.b con una tasa de transferencia de 11 Mbps y el 802.11.a con una tasa de 54 Mbps.

En Julio de 1999 se libera el estándar Bluetooth del Bluetooth Special Interest Group (SIG) y que posteriormente sería estandarizado como IEEE 802.15.1 con una tasa de transferencia de 1 Mbps y en junio del 2003 es liberado el 802.11.3 con una tasa de transferencia de 55 Mbps.

Es así que las redes inalámbricas están en constante crecimiento de tal forma que día a día van reemplazando a la tecnología de redes cableadas debido a su flexibilidad y fácil instalación. Su desarrollo y tecnología ha sido capaz de integrar en éstas a pequeños dispositivos llamados sensores. Esto nos lleva a conocer una tecnología reciente, innovadora, capaz de solucionar problemas de forma rápida y confiable.

La capacidad de monitorear y manipular elementos o fenómenos físicos presenta enormes posibilidades para casi cualquier disciplina científica. Particularmente, el procesamiento de señales distribuidas en estas redes de sensores inalámbricas ofrece oportunidades y desafíos para investigar las necesidades de estos sistemas que se encuentran masivamente distribuidos, físicamente acoplados, conectados inalámbricamente y limitados energéticamente.

La disponibilidad de sensores de bajo consumo, actuadores, procesadores embebidos y transmisores permite la aplicación del censado inalámbrico distribuido a una gran variedad de aplicaciones incluyendo monitoreo ambiental (aire, agua, suelo, variables químicas), vigilancia militar, instrumentación de planta, seguimiento de inventario, aplicaciones médicas y por último la agricultura.

Actualmente una de las necesidades más importantes de esta variedad de aplicaciones es contar con la información lo más rápido posible, es así que las redes de sensores inalámbricas proveen una latencia de procesamiento muy baja, es decir, son capaces de transmitir los datos tan rápidos como sean capturados por el sensor a través de la red ruteando así los paquetes hasta el nodo destino, permitiendo así una respuesta oportuna al estímulo.

Así se tiene que las redes de sensores inalámbricas son actualmente una tecnología de punta aplicada a las necesidades actuales en el mercado, que requieran soluciones rápidas y de fácil implementación. Las redes de sensores inalámbricas es una tecnología que está en constante desarrollo, es así como distintas asociaciones, empresas y universidades están dedicando tiempo e invirtiendo recursos en el desarrollo de la " Tecnología del Futuro".

1.2. ¿Qué es una red de sensores inalámbricos o Wireless Sensor Networks (WSN)?

Un sistema WSN es una red con numerosos dispositivos distribuidos espacialmente que están equipados con sensores para monitorear condiciones físicas y ambientales. Los dispositivos son unidades autónomas que constan de un microcontrolador, una fuente de energía (casi siempre una batería), un radio tranceptor y un elemento sensor. Estos dispositivos se comunican de manera inalámbrica a una puerta de enlace central (gateway), el cual proporciona una conexión al entorno cableado donde se puede adquirir, procesar, analizar y presentar los datos de medida. Para incrementar la distancia y la fiabilidad en una red de sensores inalámbrica, se puede usar nodos router para lograr un enlace de comunicación adicional entre los nodos finales y el gateway.

Esta clase de redes se caracterizan por su facilidad de despliegue y por ser auto configurables, pudiendo convertirse en todo momento en emisor, receptor, ofrecer servicios de encadenamiento entre nodos sin visión directa, así como registrar datos referentes a los sensores locales de cada nodo. Otra de sus características es su gestión eficiente de la energía, que les permite obtener una alta tasa de autonomía que las hacen plenamente operativas.

1.3. Características de las redes de sensores inalámbricas.

A continuación, se describen algunas características importantes relacionadas con las redes de sensores inalámbricas:

1.3.1. Ruteo dinámico.

El recorrido que deben hacer los paquetes que viajen a través de la red hasta llegar a su destino sin importar la presencia de fallas en el canal de comunicación o sin importar la presencia de congestión es debido del ruteo dinámico, el cual cambiará dinámicamente y de forma óptima las rutas a seguir como se muestra en las figuras 2, 3 y 4. [3]

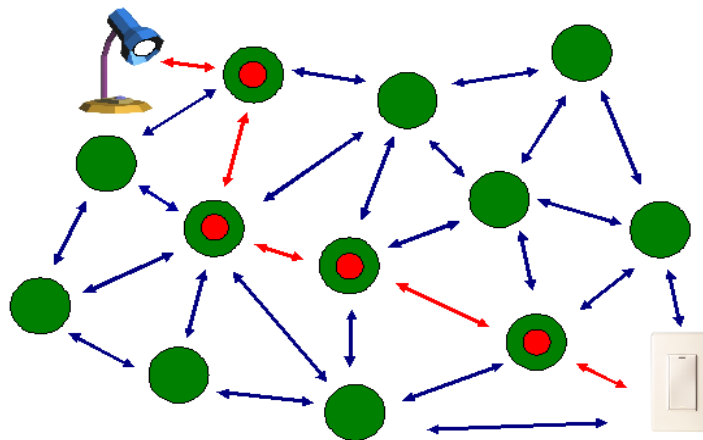


Fig. 2: Camino de comunicación (interconexión).

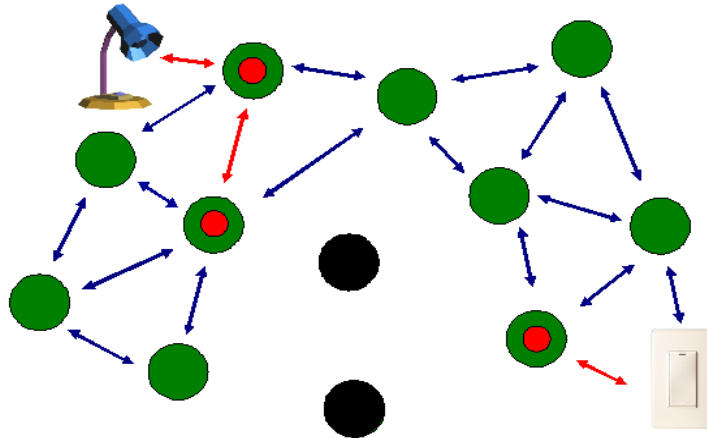


Fig. 3: Caída de dos nodos de red

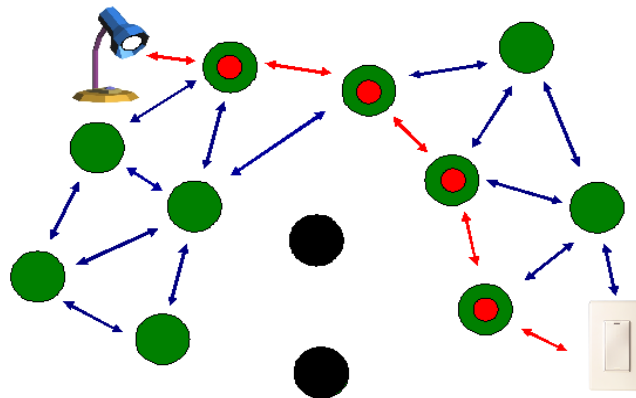


Fig. 4: Creación de un camino alternativo

1.3.2. Bajo costo de mantenimiento.

Gracias a que la red de sensores inalámbrica es capaz de auto mantenerse en el transcurso del tiempo el costo de mantenimiento se vería reducido en un factor importante dando como resultado un sistema más económico. Auto mantenerse significa que la red sería capaz de informar al momento de una baja en las baterías, sería capaz de informar una falla en algún nodo de la red al coordinador y tendría la capacidad de agregar o eliminar nodos de la red de forma dinámica.

1.3.3. Baja latencia para aplicaciones críticas.

Una característica importante es la rapidez con que la red de sensores inalámbrica responde a las distintas señales de operación y estímulos de hardware, es decir, presenta una rápida reacción tanto a señales de control como a señales de medición.

1.3.4. Bajo consumo de energía.

La electrónica o hardware implementado en una red de sensores inalámbrica y en particular en los nodos sensores es de un bajo consumo de energía, lo cual se refleja positivamente en el tiempo de vida del nodo.



1.3.5. Sistema portable y flexible.

Ser un sistema portable hace a las redes de sensores inalámbricas ser un sistema fácil de transportar desde y hacia cualquier zona. La tecnología de las redes de sensores inalámbricas les permite ir donde una red de sensores cableada no puede llegar.

1.3.6. Soporta varios tipos de topologías.

Una red formada por dispositivos ZigBee puede tener distintas topologías tales como: estrella, árbol, malla, etc. La más usada es la organización en malla, lo que quiere decir esta topología es que un nodo ZigBee puede estar conectado a su vez a otros más de la misma red. De este modo, se asegura la comunicación entre todos los nodos porque siempre habrá un camino para seguir en caso de caída de uno.

1.4. Algunas aplicaciones potenciales de las WSN.

Actualmente estas redes toman una fuerte participación en distintas áreas de la ciencia y la ingeniería, es así que se hacen presentes en industrias de control, industrias de monitoreo de sistemas de seguridad (aplicaciones en sistemas de acceso a puertas magnéticas, sensores de humo, sensores de rupturas de ventanas, monitoreo de estructuras y construcciones), monitoreo de energía, monitoreo en las industrias automotrices y en el monitoreo de variables ambientales en zonas agrícolas.

En la industria de monitoreo de sistemas de seguridad las aplicaciones de las redes de sensores inalámbricas son actualmente una solución factible, ya que no se necesita implementar todo un cableado por la casa para instalar el sistema de seguridad si no que basta con colocar un nodo central de mando o coordinador el cual conectado de forma inalámbrica directamente con los sensores y con la central de seguridad será capaz de recibir las señales de alerta de forma rápida, segura y sin tener un problema por una falla en el cable.

Otro ejemplo característico de las redes de sensores inalámbricas es, en los sistemas de detección de incendio, es aquí donde los sensores de humo instalados en casi todos los pisos de un edificio conectados de forma inalámbrica tendrán que reaccionar casi instantáneamente al momento de detectar humo y así accionar los dispositivos de agua en el sector donde se recibió la señal de alarma.

Una última aplicación bastante representativa de la potencialidad de las redes de sensores inalámbricas es al sector agrícola, por ejemplo, en un huerto en donde se requiere conocer la temperatura de la tierra, el pH, la humedad, la velocidad del viento, la cantidad de fertilizante, etc. son algunas de las variables que interesarán a un agricultor al momento de cuidar el cultivo y querer optimizar la producción apuntando a un producto de mejor calidad.

1.5. Arquitectura del sistema WSN y protocolos de comunicación inalámbrica.

Típicamente, el modelo seguido por las aplicaciones es el siguiente: realizar una serie de mediciones sobre el medio, transformar dicha información en digital en el propio nodo y transmitir fuera de la red de sensores vía un elemento gateway a una estación base, donde la información pueda ser almacenada y tratada temporalmente para acabar finalmente en un servidor con mayor capacidad que permita componer un histórico o realizar análisis de datos.

En una red de sensores inalámbricos, por lo tanto, podemos encontrarnos entonces:



- Nodos inalámbricos
- Puertas de enlace
- Estaciones base

1.6. Nodo inalámbrico

El nodo sensor combina capacidades de recolección, procesado y transmisión de datos en un mismo dispositivo, logrando todo esto con un reducido costo económico, tamaño y consumo de potencia. Los sensores que lleva incorporado el nodo pueden ser de diferentes tipos: presión, humedad, temperatura, movimiento, etc. dando lugar a las distintas aplicaciones posibles que comentamos en el apartado anterior. De esta forma, podemos establecer una serie de características generales que se dan para los nodos sensores:

1. Integran sensores para realizar mediciones. Éstos pueden ser de luz, temperatura, presión, humedad, deformación, aceleración, etc.
2. Están limitados en diferentes aspectos:
 - a. Energía. Debido a que suelen estar alimentados por medio de baterías por lo que el bajo consumo es una de sus prioridades.
 - b. Capacidad de cómputo y memoria. Aún no disponen de grandes capacidades de procesador y de almacenamiento, aunque este campo está desarrollándose y ampliándose cada día.
3. Hacen un uso intensivo del CPU para el procesamiento y de la radio para enviar y recibir mensajes, de hecho, ésta es una de las bases de esta tecnología.
4. Los sensores son de bajo costo.
5. Son autónomos y operan de forma independiente.

Por otro lado, podemos establecer una serie de factores que evalúan y catalogan los tipos y características de los nodos sensores. Estos factores serían: energía, flexibilidad, robustez, seguridad, comunicación, computación, sincronización, tamaño y costo.

1.7. Componentes de un nodo sensor

Un nodo sensor está formado por cinco componentes básicos:

1. Sensores y actuadores

Un sensor es un dispositivo físico que detecta propiedades físicas, biológicas, químicas de su ambiente y convierte estas propiedades en una señal eléctrica. Un actuador normalmente acepta una señal eléctrica y la convierte en una acción física para actuar sobre el medio en el que se encuentra.



2. Procesador.

Normalmente asociado a una pequeña unidad de almacenamiento, es un ordenador en un chip, autosuficiente y de bajo costo que se utiliza para controlar la funcionalidad y el flujo de datos de dispositivos electrónicos para almacenar y/o procesar datos.

3. Transmisor / Receptor de radio.

Cada uno de los nodos de un sistema de redes de sensores inalámbricos comprende una unidad de Transmisor / Receptor de radio, la cual está a cargo de la comunicación inalámbrica con sus compañeros realizando las operaciones de transmisión y recepción de mensajes.

4. Fuente de energía.

Uno de los componentes más importantes, se obtiene a partir de baterías, aunque puede estar ayudado de un generador, como celdas solares que obtienen energía del entorno.

5. Memoria.

Desde el punto de gasto de energía, las clases más relevantes de memoria son la memoria integrada en el chip de un microcontrolador y la memoria flash, la memoria RAM fuera del chip es raramente usada.

Los requerimientos de memoria dependen mucho de la capacidad que necesite nuestra aplicación. Hay dos categorías de memoria según el propósito del almacenamiento:

- a. Memoria usada para almacenar los datos recogidos por la aplicación.
- b. Memoria usada para almacenar el programa del dispositivo.

1.8. Optimización del consumo de energía

El consumo de energía de los nodos sensores, como se ha comentado, es una de las principales limitaciones que tienen estos dispositivos. Por ello, se tienen que hacer estrategias hardware y software para conseguir un ahorro de energía, de modo que el tiempo y la duración del nodo en la red con suficiente energía sea el máximo posible.

Un nodo sensor tiene tres estados de funcionamiento:

- **Modo Sleep:** estado en el que el nodo está durmiendo o está inactivo. Se pretende que el nodo este la mayor parte del tiempo posible en este estado y que su consumo sea el mínimo.
- **Modo Wakeup:** estado de cambio, en el que el nodo se despierta y va a pasar a un estado activo. Se produce cuando el sensor recibe algún cambio, estímulo o interrupción programada dentro de sus funciones de detección y análisis. Uno de los objetivos es que el tiempo de wakeup sea mínimo para pasar rápidamente al estado de trabajo.
- **Modo Active:** es el estado activo del nodo, donde está realizando el trabajo de adquisición, procesamiento y transmisión de datos. Por supuesto, este tiempo debe ser mínimo para volver cuanto antes al modo sleep, ya que el consumo de energía en este modo es el mayor de los tres que se dan en cada fase.

1.9. Tecnología ZigBee

1.9.1. ¿Qué es ZigBee?

ZigBee (Zumbido de abejas) es un protocolo de comunicación inalámbrica para su utilización con radios digitales, este protocolo está basado en el estándar IEEE 802.15.4 de Redes Inalámbricas de Área Personal (WPAN).

Toma su nombre inspirándose en un panal de abejas, en el cual los organismos individuales trabajan juntos para realizar tareas complejas.

En su forma básica se concibe un área de comunicación de 10 a 70 metros con una tasa máxima de transferencia de 250 kbps. Utiliza la banda de 2.4-2.483 GHz, esta es parte de la banda de frecuencias Industrial, Científica y Médica (ISM).

La tecnología está diseñada con el objetivo de ser más simple y barata que otras WPANs tales como Bluetooth, y está apuntando su uso al de aplicaciones de bajas tasas de datos y bajo consumo de potencia. Finalmente, el intervalo de transmisión está entre los 10 y 75 metros, dependiendo de la potencia de transmisión y del entorno, aunque pueden construirse redes que cubran grandes superficies ya que cada ZigBee actúa de repetidor enviando la señal al siguiente, etc.

Además de ser el estándar aceptado y utilizado por las WSN, ZigBee es un sistema ideal para redes domóticas, específicamente diseñado para reemplazar sensores y actuadores individuales. ZigBee fue creado para cubrir la necesidad del mercado de un sistema a bajo costo, un estándar para redes Wireless de pequeños paquetes de información, bajo consumo, seguro y fiable.



Fig. 5: Aplicaciones domóticas ZigBee.



1.9.2. Redes ZigBee

Elementos necesarios en el protocolo ZigBee:

1. **Coordinador.** Este radio es responsable de configurar la red, distribuir direcciones y administrar las otras funciones que definen la red, la protegen y la mantienen en buen estado. A continuación, las características principales:
 - ✓ Es el encargado de seleccionar el canal y el identificador de red (PAN ID) cuando se inicializa la red.
 - ✓ Permite que otros dispositivos se unan a la red.
 - ✓ Almacena paquetes de datos para dispositivos en reposo.
 - ✓ Debe estar conectado siempre a una toma de corriente. (Nunca duerme).
 - ✓ Controla la red y las rutas que deben seguir los dispositivos para interconectarse.
 - ✓ Debe existir solo uno por red.
 - ✓ Puede ser padre, pero no puede ser hijo.

2. **Router.** Un router es un nodo ZigBee con todas las funciones. Puede unirse a redes existentes, enviar información, recibir información e información de rutas, a continuación, más características:
 - ✓ Debe unirse a una WPAN antes de enviar, recibir o repetir información.
 - ✓ Después de unirse a una WPAN, puede permitir que se unan más dispositivos.
 - ✓ Debe estar conectado siempre a una toma de corriente. (Nunca duerme).
 - ✓ Puede almacenar paquetes para dispositivos que se encuentren en modo sueño.
 - ✓ Puede ser padre e hijo al mismo tiempo.

3. **Dispositivo Final.** Los dispositivos finales son esencialmente versiones reducidas de un router. Pueden unirse a redes y enviar y recibir información, pero eso es todo.
 - ✓ Necesita unirse a una WPAN antes de que pueda enviar o recibir datos.
 - ✓ Solo puede enviar o recibir datos a través de un padre (router o coordinador).
 - ✓ Puede configurarse en modo sueño para ahorro de energía.
 - ✓ Puede usar baterías o conectarse a una toma de corriente.
 - ✓ Solo puede ser hijo.
 - ✓ No puede permitir que otros dispositivos se unan a la red.
 - ✓ No puede almacenar paquetes de datos de dispositivos en reposo o en modo sueño.
 - ✓ Los dispositivos finales son una buena opción para dispositivos de baja potencia.
 - ✓ Si el padre desaparece, el dispositivo final intentará encontrar otro padre.
 - ✓ Como los routers o coordinadores pueden tener que retener paquetes de datos para sus hijos por algún tiempo, estos solo pueden soportar un número finito de hijos dispositivos finales.
 - ✓ Los dispositivos finales no siempre están asociados con el padre más cercano.
 - ✓ Pueden entrar en modo sueño en los siguientes casos.
 - i. Por medio de un pin digital.
 - ii. En ciclos o periodos de tiempo, el dispositivo final dormirá por periodos de tiempo establecidos

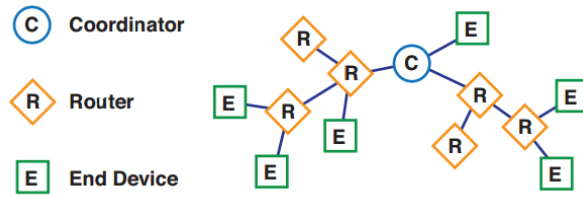


Fig.6: Elementos en una red ZigBee.

1.9.3. Estructura y Limitaciones de los Radios que soportan ZigBee.

Máximo de dispositivos-Hijo: El Coordinador y cada Router agregado pueden soportar hasta 20 hijos, 6 de los cuales pueden ser Routers como se muestra en la figura 7.

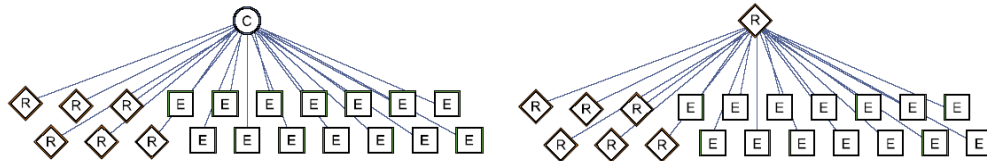


Fig. 7: Máximos Dispositivos-Hijo

Profundidad Máxima de la Red: El valor máximo es 5 niveles. La profundidad máxima de la red se refiere al nivel de descendientes desde el Coordinador como se ilustra en la figura 8.

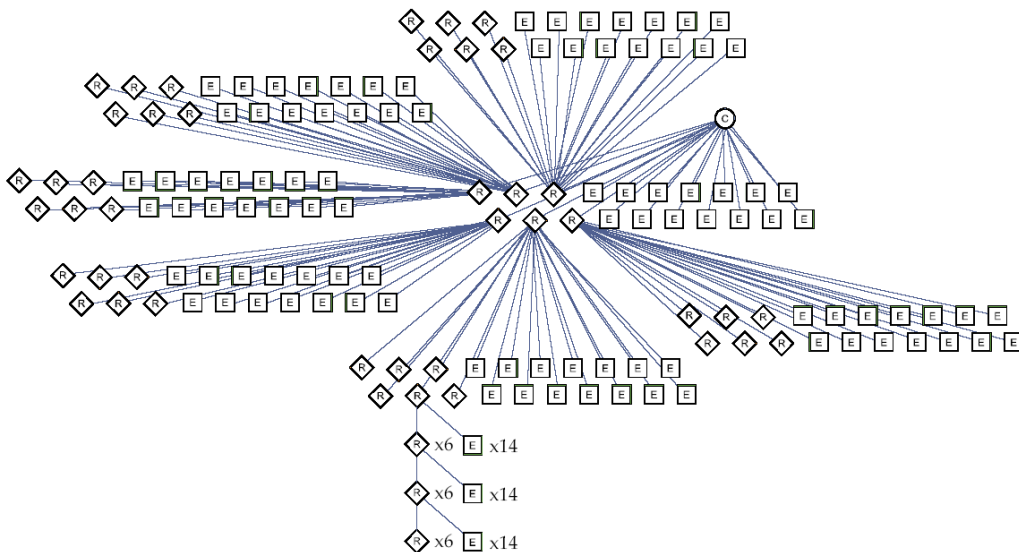


Fig. 8: Profundidad Máxima de la Red



2. ANTECEDENTES

Desde hace casi 3 años, el área de integración tecnológica en conjunto con la empresa, hemos trabajado analizando distintas alternativas para lograr un eficiente sistema de telegestión.

Como resultado hemos logrado un sistema de múltiples redes de medidores inteligentes ZigBee. El sistema desarrollado capta y transmite en línea al sistema de facturación de la empresa proveedora del servicio eléctrico las lecturas hechas por los medidores electrónicos, incluyendo la posibilidad de administrar el corte y la reconexión en forma remota, lo que permite garantizar la medición precisa del consumo de energía del usuario, así como también ayudar a eliminar el robo de energía eléctrica.

3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Las pérdidas de energía en los sistemas de distribución es un problema importante que enfrentan las empresas de energía eléctrica. En México, cada año se pierde más del 21% de la energía que se genera.[4]

Este problema recae principalmente en la gestión de los servicios públicos, es decir, en la eficiencia y optimización de recursos. La falta de inversión en los sistemas de distribución y comercialización de energía eléctrica no sólo conduce al deterioro en la calidad del servicio, sino que también es uno de los principales factores en el aumento de las pérdidas de energía, tanto técnicas como no técnicas. Primordialmente, las pérdidas técnicas se deben al calor que se produce cuando la electricidad pasa a través de las líneas de transmisión y de los transformadores, mientras que las pérdidas no técnicas se producen cuando la energía se toma del sistema sin que el medidor de energía registre el consumo, ya sea por robo, por manipulación de equipos o de los sistemas de facturación para modificar los registros de consumo, entre otros.[5]

El sistema de distribución de energía eléctrica es el encargado de proporcionar la energía a los consumidores finales, la cual se transporta a través de redes de distribución de las plantas eléctricas a los usuarios. Las pérdidas de energía se refieren a la energía eléctrica que se produce y transporta, pero que las empresas que prestan el servicio no facturan. Esto sucede a causa de que la energía se pierde a lo largo del proceso o a causa de problemas de gestión o porque se ha tomado de manera ilegal.

Las pérdidas no técnicas de energía son un tema importante en la generación de energía eléctrica y representan un gran reto, ya que las empresas de generación eléctrica están perdiendo una cantidad considerable de dinero. Se han realizado diversos esfuerzos para atacar este problema, que se han centrado principalmente en el robo de la energía, sin embargo, el problema ha persistido. [6]

Como parte de la estrategia para resolver esta problemática, una de las divisiones de la empresa prestadora del servicio eléctrico propuso modernizar y actualizar la infraestructura de medidores eléctricos actualmente operativos en el país, para que los medidores alcanzaran características AMI del inglés: Advanced Metering Infrastructure, es decir capacidad para dar lectura, corte y reconexión de manera remota.

4. DESARROLLO DEL PROYECTO

Siendo la medición avanzada una de las principales áreas de aplicación de las redes de sensores inalámbricos (WSN) fue que se le propuso al cliente agregar la conectividad inalámbrica a los medidores eléctricos mediante un sistema de múltiples redes con tecnología ZigBee, ya que esta tecnología está enmarcada dentro de las redes inalámbricas de área personal (WPAN). Su principal objetivo es la adquisición y el tratamiento de datos de forma flexible y autónoma con múltiples aplicaciones en distintos campos.

El desarrollo del proyecto se llevó a cabo en las siguientes fases:

4.1. Fase 1: Elección del módulo de comunicación ZigBee

Una de las políticas de la empresa en la que laboro suscribe que en el desarrollo de proyectos se deben utilizar preferentemente los productos de las marcas que distribuimos, debido a esto la búsqueda del módulo de comunicación se limitó a los productos de Digi International que es una empresa líder global en productos y de servicios de conectividad para el Internet de las Cosas (Internet of Things, IoT), dentro de los cuales podemos encontrar diversas familias de módulos y un amplio número de productos transceptores de radio frecuencia (RF).

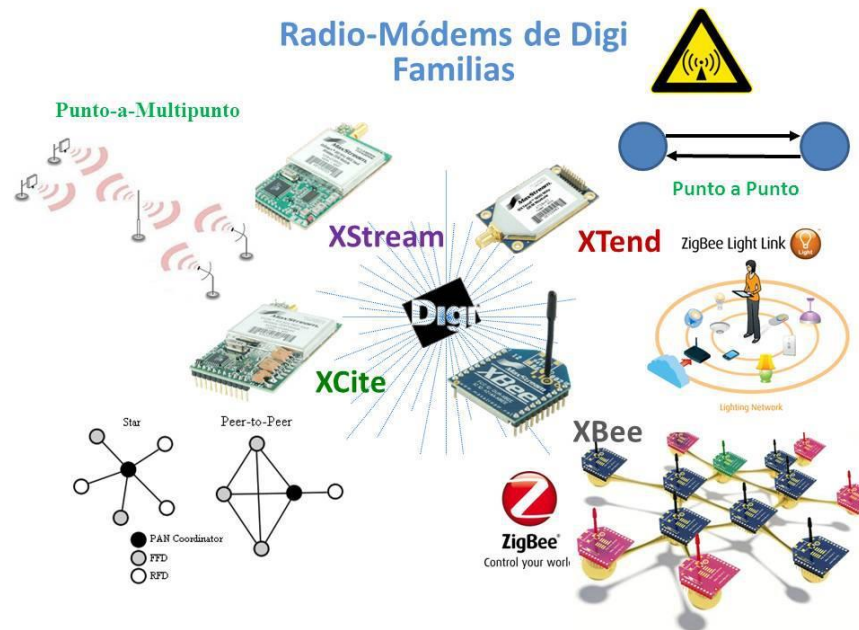


Fig. 9: Algunas familias de productos RF Digi

La familia de radios elegida fue “XBee” ya que estos módulos son soluciones integradas que brindan un medio inalámbrico para la interconexión y comunicación entre dispositivos. A su vez la familia se divide en series, de las cuales se eligió la serie S2C que son módulos XBee que ofrecen principalmente la topología Mesh (malla).



Fig. 10: Abanico de protocolos globales y frecuencias XBee.

Es importante mencionar que la versión XBee ZigBee S2C utiliza el transceptor EM357. El transceptor EM357 es más rápido, tiene menor consumo de corriente y tiene mucha más memoria RAM y Flash en comparación con los transceptores RF que utilizan otras familias. Estas funciones avanzadas permiten que los módulos basados en EM357 soporten más tráfico de red, tengan más memoria para las actualizaciones de código y funcionen de manera más eficiente. [7]. El XBee de la serie ZigBee S2C utilizado para el desarrollo del proyecto fue el XBee-PRO® Programmable, este módulo a diferencia de los demás de la serie, cuenta con un microcontrolador adicional que le da la capacidad para almacenar y ejecutar código personalizado, es decir que cuenta con todas las características de un XBee y que además tiene la capacidad de programación.

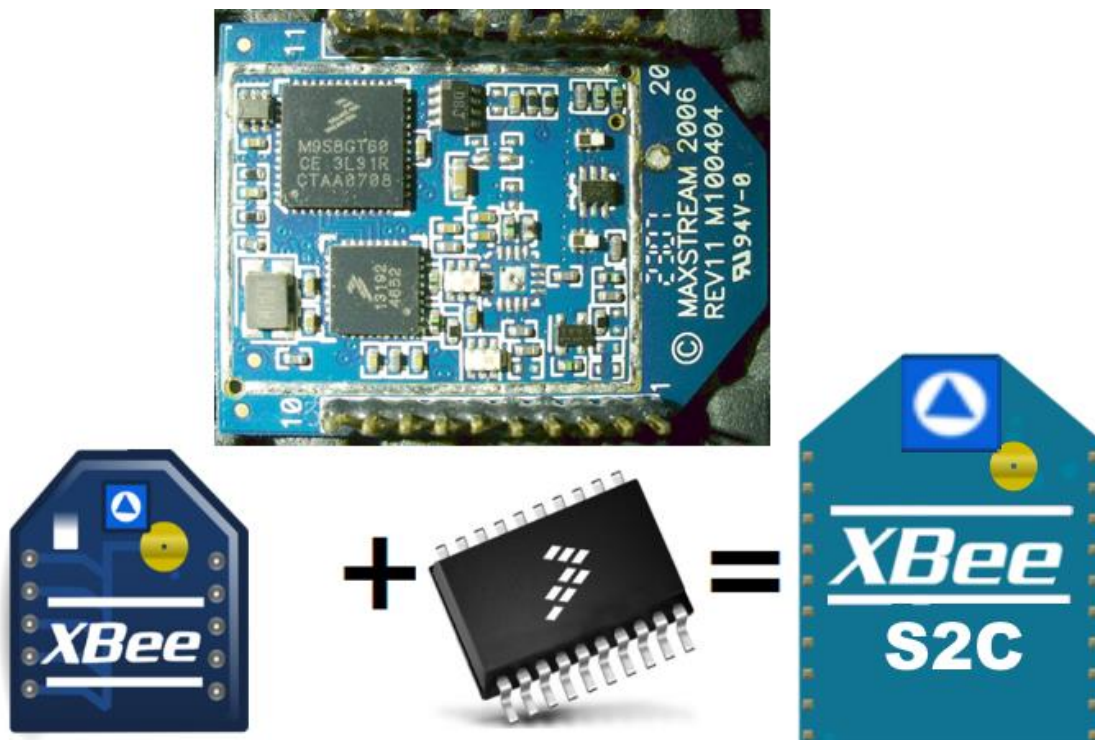


Fig. 11: XBee Pro Programmable.

4.2. Fase 2: Código fuente

El módulo XBee PRO programable está equipado con un procesador MC9S08QE32. Las líneas de código con los pasos a seguir fueron hechas en el software de desarrollo CodeWarrior®.

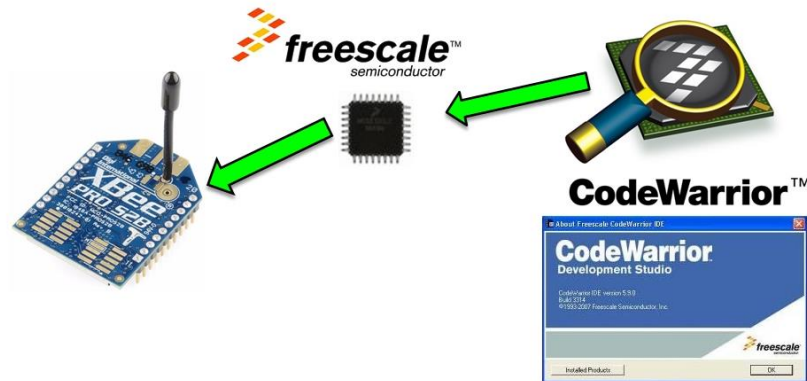


Fig. 12: Programación en CodeWarrior IDE.

Se desarrollaron dos códigos fuente, para los nodos colector programable y para remoto programable:

4.2.1. Firmware Colector programable

A continuación, se describen las funciones principales del código fuente:

- Función para recibir eventos de estado del modem:

```
#ifndef ENABLE_XBEE_HANDLE_MODEM_STATUS_FRAMES
int xbee_modem_status_handler(xbee_dev_t *xbee, const void FAR *payload,
uint16_t length, void FAR *context)
{
    const xbee_frame_modem_status_t FAR *frame = payload;

    if (frame->status == XBEE_MODEM_STATUS_JOINED)
        joined = 1;
    if (frame->status == XBEE_MODEM_STATUS_DISASSOC)
        joined = 0;
    return 0;
}
#endif
```



- Función para el manejo de la recepción de datos:

```
#ifndef ENABLE_XBEE_HANDLE_RX
int xbee_transparent_rx(const wpan_envelope_t FAR *envelope, void FAR
*context)
{
    uint8_t *payload_pointer = envelope->payload;
    payload_pointer[envelope->length] = '\0';
    if (memcmp(&envelope->ieee_address, &dest_node.ieee_addr_be, sizeof
envelope->ieee_address) == 0) {
        uart_write(envelope->payload, envelope->length);
        sys_xbee_tick();
    }
    return 0;
}
#endif
```

- Función para el descubrimiento de nodos:

```
#ifndef ENABLE_XBEE_HANDLE_ND_RESPONSE_FRAMES
void node_discovery_callback(xbee_dev_t *xbee, const xbee_node_id_t
*node_id)
{
    if (strcmp(node_id->node_info, linebuf2) == 0) {
        delay_ticks(200);
        memcpy(&dest_node, node_id, sizeof(dest_node));
        node_found = TRUE;
        printf("CONECTADO");
    }
}
```

- Función principal:

```
void main(void)
{
    wpan_envelope_t env;
    char *plinebuf2 = linebuf2;
    sys_hw_init();
    sys_xbee_init();
    printf("PAN ID: %s\n", XBEE_ATCMD_PARAM_ID);
    for (;;)
    {
        switch (system_stage)
        {
            case CONNECTING:
                do {
                    sys_watchdog_reset();
                    sys_xbee_tick();
                    if (periodic_task_flag) {
                        send_query_radio_status();
                        periodic_task_flag = FALSE;
                    }
                } while (!joined);
                system_stage = DISCOVERING_NODE;
                break;
        }
    }
}
```



```
case DISCOVERING_NODE:
    do {
        do {
            sys_xbee_tick();
            sys_watchdog_reset();
        } while (!captura_por_serial2(&plinebuf2,
MAX_LINE_LEN2, O_NONBLOCK) && !node_found);
        if (strcmp(BRK, linebuf2)==0) {
            printf("RSOK\n");
            system_stage = RESTART;
        }
        else if (strcmp(RST, linebuf2)==0) {
            sys_reset(BL_CAUSE_NOTHING);
        }
        else if (!node_found)
        {
            delay_ticks(200);
            xbee_disc_discover_nodes(&xdev,
linebuf2);
        }
        } while (!node_found);
        wpan_envelope_create(&env, &xdev.wpan_dev,
&dest_node.ieee_addr_be, WPAN_NET_ADDR_UNDEFINED);
        if (strcmp(BRK, linebuf2)==0) {
            system_stage = RESTART;
        }
        else if (strcmp(RST, linebuf2)==0) {
            sys_reset(BL_CAUSE_NOTHING);
        }
        else {
            system_stage =
NI_CONFIRMATION;
        }
        break;
case NI_CONFIRMATION:
    captura_por_serial2(&plinebuf2, MAX_LINE_LEN2, 0);
    printf("NIOK\n");
    printf("CONECTADO");
    system_stage = TRANSPARENT_COMMUNICATION;
    break;
case TRANSPARENT_COMMUNICATION:
    while (system_stage == TRANSPARENT_COMMUNICATION)
    {
        env.payload = linebuf2;
        env.length = captura_por_serial(&plinebuf2,
MAX_LINE_LEN2, O_NONBLOCK);
        if (env.length) {
            if
(linebuf2[0]==0x42&&linebuf2[1]==0xD2&&linebuf2[2]==0x4B&&linebuf2[3]==0x
8D)
            {
                system_stage = RESTART;
            }
        }
    }
}
```



```
                if
(linebuf2[0]==0xD2&&linebuf2[1]==0x53&&linebuf2[2]==0xD4&&linebuf2[3]==0x
8D)
                    {

sys_reset(BL_CAUSE_NOTHING);
                    }

                else if (joined) {

xbee_transparent_serial(&env);
                    }

                else{
                    system_stage = RESTART;
                }
            }
            sys_xbee_tick();
            sys_watchdog_reset();
            if (periodic_task_flag) {
                send_query_radio_status();
                periodic_task_flag = FALSE;
            }
        }
        break;
    case RESTART:
    default:
        periodic_task_flag = TRUE;
        joined = 0;
        node_found = FALSE;
        memset(linebuf2,0, sizeof linebuf2);
        system_stage = CONNECTING;
        break;
    }
}
}
```

4.2.2. Firmware Remoto programable

A continuación, se describen las funciones principales del código fuente:

- Función para recibir eventos de estado del modem:

```
#ifndef ENABLE_XBEE_HANDLE_MODEM_STATUS_FRAMES
int xbee_modem_status_handler(xbee_dev_t *xbee, const void FAR *payload,
uint16_t length, void FAR *context)
{
    const xbee_frame_modem_status_t FAR *frame = payload;
    modem_status_handler_signaled = TRUE;
    if (frame->status == XBEE_MODEM_STATUS_JOINED)
        joined = 1;
    if (frame->status == XBEE_MODEM_STATUS_DISASSOC)
        joined = 0;
    return 0;
}
#endif
```



- Función para el manejo de la recepción de datos:

```
#ifndef ENABLE_XBEE_HANDLE_RX
int xbee_transparent_rx(const wpan_envelope_t FAR *envelope, void FAR
*context)
{
    char gotmac;
    uint8_t *payload_pointer = envelope->payload;
    //payload(contenido del mensaje)
    payload_pointer[envelope->length] = '\0'; /* Agregar elemento
nulo-terminador para imprimir */
    addr64_format(addrbuf, &envelope->ieee_address);
    sys_watchdog_reset();
    gotmac = (char)addr64_parse(&ieeeaddr, addrbuf);
    wpan_envelope_create(&env, &xdev.wpan_dev, &ieeeaddr,
WPAN_NET_ADDR_UNDEFINED);
    env.payload = linebuf2;

    if(! strcmp( payload_pointer, "ABYZ",4))
    {
        env.length = sprintf(linebuf2,"RESET OK");
        xbee_transparent_serial(&env);
        delay_ticks(5);
        sys_reset(BL_CAUSE_NOTHING);
    }

    uart_write(envelope->payload, envelope->length);
    sys_xbee_tick();

    return 0;
}
#endif
```

- Función principal

```
void main(void)
{
    int p=0;
    char *plinebuf2 = linebuf2;
    uint8_t step;
    sys_hw_init();
    sys_xbee_init();
    sys_app_banner();

    xbee_cmd_simple(&xdev, "JV", 1);

    step = 1;
    joined = 0;
    xbee_cmd_execute(&xdev, "NR", 0x00, 1);

    do {
        sys_watchdog_reset();
        sys_xbee_tick();
        p++;
        delay_ticks(3);
        if (p==25000){sys_reset(BL_CAUSE_NOTHING);}
    }
```




```
    } while (!joined);

    printf("COORDINADOR Encontrado\n");

    rtc_set_timeout(2); /* To ensure it enters first time */
    printf("Esperando hasta que el dispositivo se conecte...\n");
    for (;;) {
        if (modem_status_handler_signaled == TRUE) {
            modem_status_handler_signaled = FALSE;

            printf("%s\n", joined ? "Conectado" :
"Desconectado");
        }
        if (joined) {
            if (rtc_timeout_expired() && at_response_status ==
RESPONSE_NOT_UPDATED) {
                printf("Paso %d de 5: ", step);
                switch (step) {
                    case 1:
                        printf("Leyendo PAN ID
actual\n");
                        get_atcmd_value("OP");
                        break;
                    case 2:
                        printf("Cambiando el valor del
ID local por el del coordinador\n");
                        set_atcmd("ID", current_panid,
sizeof current_panid); //para configurar ID local
                        break;
                    case 3:
                        printf("leyendo el valor ID
local\n");
                        get_atcmd_value("ID");
                        break;
                    case 4:
                        printf("Guardando valor en
FLASH\n");
                        xbee_cmd_execute(&xdev, "WR",
NULL, 0);
                        break;
                    default:
                        printf("Terminado, El sistema se
detuvo\n");
                }
                for(;;) {
                    env.length =
                    captura_por_serial(&plinebuf2, MAX_LINE_LEN2, O_NONBLOCK);
                    if
                    (env.length) {
                        (void)xbee_transparent_serial(&env);
                    }
                    if
                    (periodic_task_flag)
                    {
                        send_query_radio_status();
                    }
                }
            }
        }
    }
}
```

```
periodic_task_flag = FALSE;
}

sys_watchdog_reset();

sys_xbee_tick();
}
break;
}
step++;
rtc_set_timeout(HZ);
}
if (at_response_status != RESPONSE_NOT_UPDATED) {
    if (at_response_status != RESPONSE_SUCCESS)
}
at_response_status = RESPONSE_NOT_UPDATED;
}
}
//else{sys_reset(BL_CAUSE_NOthing);}

sys_watchdog_reset();
sys_xbee_tick();
}
}
```

4.3. Fase 3: Integración tecnológica

Mediante líneas de código se dieron las instrucciones a los módulos XBee para formar las diferentes redes encriptadas ZigBee. Cada medidor eléctrico lleva un radio Xbee programado que le permite comunicarse con el sistema de facturación de la empresa prestadora del servicio eléctrico formando una red ZigBee con los demás medidores y con los concentradores. La integración tecnológica se hizo mediante una tarjeta electrónica la cual permite la comunicación del radio XBee y el medidor eléctrico a través de una conexión UART a 2400 baudios.

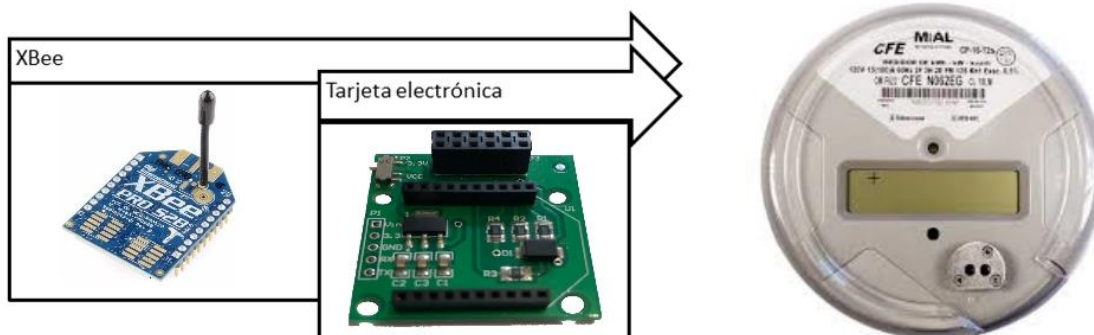


Fig. 13: Integración tecnológica

4.3.1. Desarrollo de tarjeta electrónica

El desarrollo de la tarjeta electrónica se desarrolló con base a los requerimientos funcionales del cliente. A continuación, se mencionan algunas de las especificaciones:

- La tarjeta reguladora de tensión se deberá de adaptar entre el microcontrolador del medidor eléctrico y el módulo de comunicación ZigBee, sin afectar la funcionalidad de este puerto.
- Basándose en las características del modelo XBP24BZ7WITB003A se definirá la fuente de energía a utilizar.
- La tarjeta reguladora de tensión deberá contener una línea con 5 orificios estañados al borde de la tarjeta con separación de 2.54 mm y un conector hembra de 18 pines en 2 líneas con separación de 2.54 mm que se adapte a la tensión y referencia como se puede mostrar en la siguiente imagen:

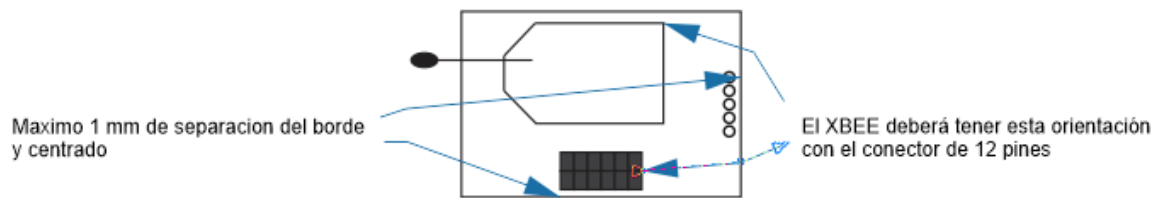


Fig. 14: Diagrama de la tarjeta reguladora de tensión

- La entrada de 4.5 – 13 Vcc deberá estar regulada dando una salida de 3.3 Vcc con una potencia de hasta 250 mA.
- La separación entre los 5 orificios “True Hole” deberá de ser de 2.54 mm y se deberá formar una línea recta entre los centros, el centro de cada orificio no deberá estar a más de 1.7 mm del borde de la tarjeta.
- Las dimensiones máximas permitidas para la tarjeta serán de 38 mm x 35 mm para el área superficial y 12 mm para su altura tomando en cuenta los remanentes de estaño que dejan los componentes “True Hole”.
- La tarjeta no deberá llevar logos más que el logo oficial de CFE impreso en cualquier capa siempre este sea visible.

Se diseñó la tarjeta en el software de diseño Altium Designer, a continuación, se muestra una imagen arrojada por el software:

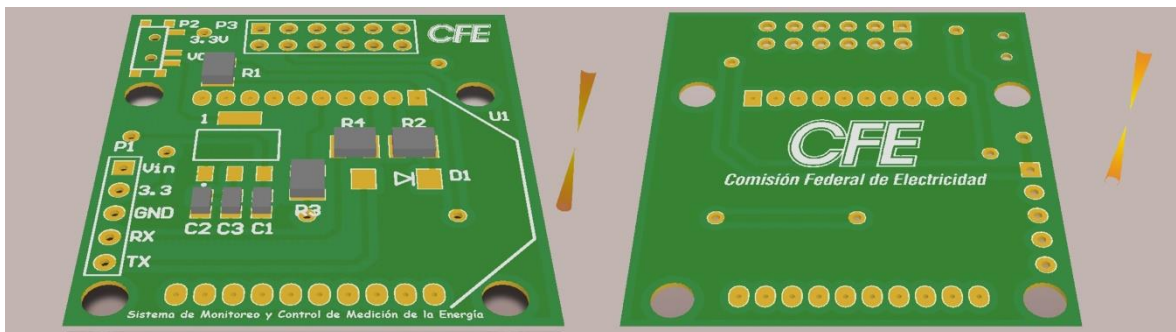


Fig. 15: Vista previa top layer/ bottom layer

4.3.1.1. Información técnica

- Tamaño:
 - Las dimensiones de la tarjeta son las siguientes:
34.29 mm X 37.203 mm
- Indicación o características técnicas donde se indiquen los pines de la tarjeta
- En todos los conectores se indica el PIN 1 con un pad cuadrado.
- En la serigrafía se muestra la posición correcta para el módulo XBee con un trapecio que asemeja la forma del módulo, también se muestra la orientación del diodo y el nombre de los 5 pines de polarización y datos.
- Espesor de circuito
 - El espesor del circuito aproximado es de 13mm +/-2mm
- Numero de capas
 - 2 capas (TOP LAYER Y BOTTOM LAYER)
- Perforaciones
 - hay 4 tamaños diferentes y son los siguientes:
 \varnothing 0.9mm, \varnothing 0.711mm, \varnothing 3.302mm y \varnothing 0.413mm.
- Grabado
 - Serigrafía y logotipo en color blanco
- Mascarillas antisoldante
 - Solder Mask Green
- Leyendas Top/Bottom
 - White Screen
- Contorno
 - 142.986 mm
- Tipo de soldadura
 - Aleación SAC 305 Libre de plomo ROHS

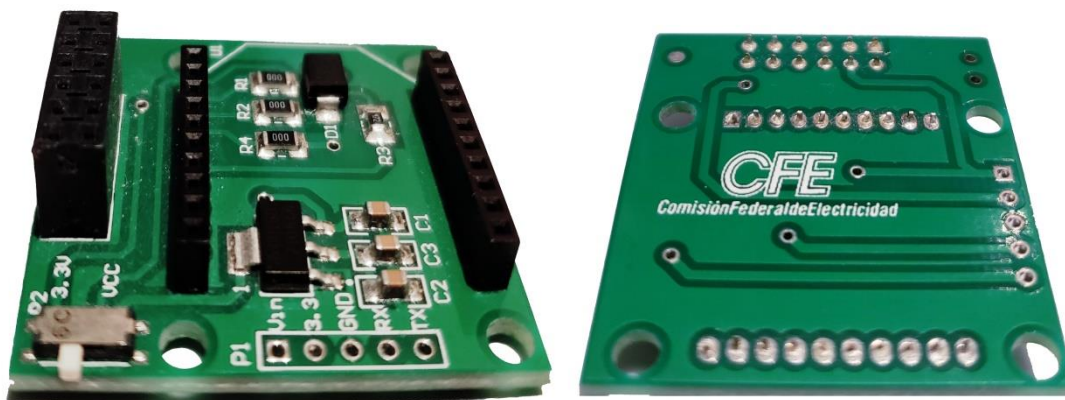


Fig. 16: Tarjeta reguladora de tensión.

Para cuestión de pruebas eléctricas y de funcionamiento se ensamblaron 5 tarjetas a mano, una vez finalizadas las pruebas, se panelizó la tarjeta en matrices de 6x5 piezas para que posteriormente se mandaran a ensamblar los componentes de las 180, 000 piezas con máquinas de ensamble automático.

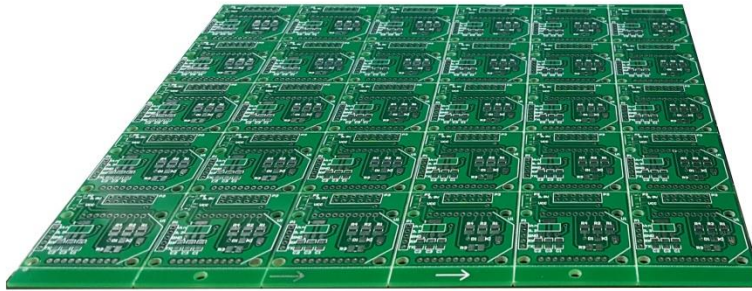


Fig. 17: Panel 6x5.

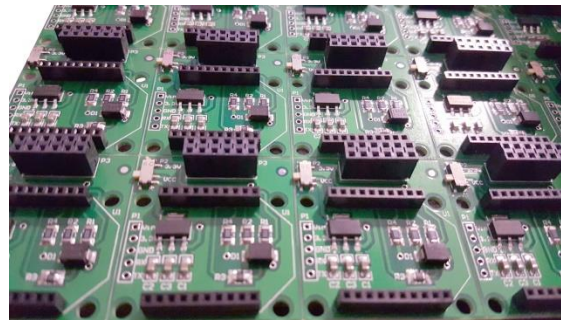


Fig. 18: Tarjetas Mixtas con componentes PTH y SMT ensambladas.

4.4. Fase 4: Arquitectura

Se desarrolló una red de redes ZigBee de 180,000 nodos remotos mediante el desarrollo de Firmware para cada uno de los elementos de la red (Coordinador, Colector, Repetidores y Nodos Remotos).

En este apartado se describe el funcionamiento del firmware XBee programable desarrollado, para abordar cuestiones operativas y de diseño. Las secciones proporcionan la arquitectura del Sistema, las funciones para la gestión de red, problemas de comunicación y las ideas para el diagnóstico.

4.4.1. Arquitectura del sistema.

El sistema consiste en una red de redes ZigBee. Un servidor central está conectado con 241 redes ZigBee con identificadores de red que van desde 0xCFE1 hasta 0xCFE241. Cada red se gestiona con dos radios en un gabinete que contiene un colector y un coordinador. El colector y coordinador están relacionados con el servidor central de la empresa proveedora de servicio eléctrico a través de un radio de largo alcance de 400 MHz y mediante su enlace de conectividad serial (UART) como se puede observar en la imagen12.

El coordinador y colector gestionan redes de 750 a 1000 nodos remotos, cada uno de los cuales están conectados a un medidor eléctrico. Bajo el mando a distancia estos medidores pueden ser mandados para activar/desactivar el servicio eléctrico, o para leer el medidor para fines de facturación. Los repetidores que no están conectados a medidores pueden aparecer en la red para ampliar el alcance o para mejorar el enrutamiento de las redes malla. La implementación piloto del sistema de CFE gestiona 180 000 nodos remotos con lecturas diarias de sus medidores eléctricos.

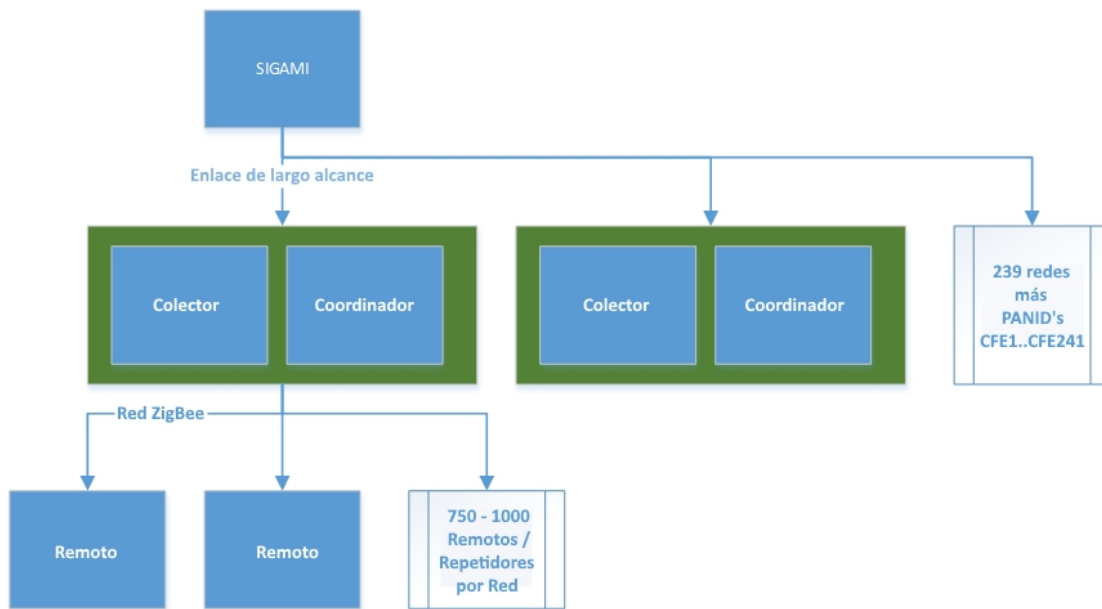


Fig. 19: Arquitectura del sistema.

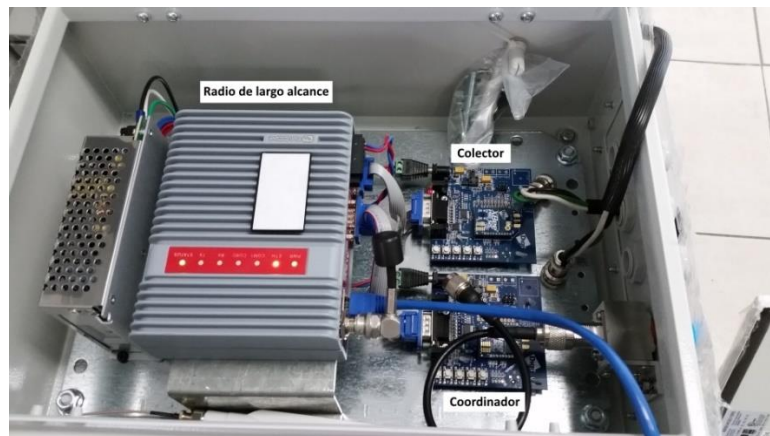


Fig. 20: Gabinete contenedor de radio de largo alcance, colector y coordinador.



Figura 21: Gabinete abierto-cerrado

4.4.2. Componentes sistema

- **SIGAMI:** Servidor Central de la empresa proveedora del servicio eléctrico.
- **Bases de datos**
- **Cadena nodo identificador (NI):** de fábrica los radios vienen con una lista de pares de direcciones MAC y cadenas NI. Cada nodo remoto está configurado con una cadena única de identificación (NI), así como también cada módulo de Digi XBee viene con una dirección MAC única.
- **Estado de la red:** un registro se mantiene en una base de datos de estado de la red para cada nodo remoto en el sistema. Cada registro contiene:
 - Dirección MAC
 - Cadena NI
 - Identificador de red PAN ID
 - Estado en línea
 - Marca de tiempo cuando un nodo remoto se unió
 - Estadísticas del colector
 - Estadísticas del remoto
 - Registro de ruta (lista de direcciones de red de 16 bits de los routers de enlace).
- **Nodo colector:** el colector es un XBee programable S2C. Hay dos diferentes firmwares para este módulo, uno para el colector programable y otro para el colector XBee. el colector XBee está configurado como: AP1, CE0, ID<fijado>, NICOLECTOR, EE1, KY0CFE00D1, DC100, JV1, BD7.

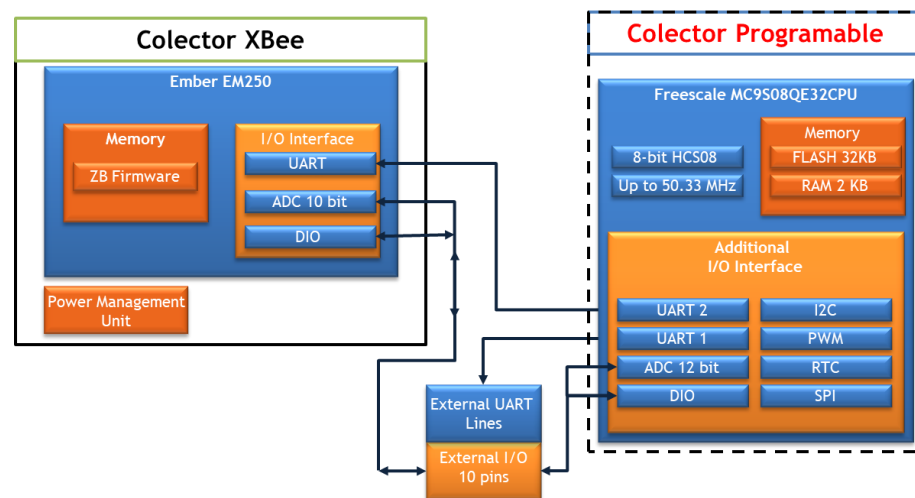


Fig. 22: Diagrama del nodo colector.

- **Nodo Coordinador:** El Coordinador es un radio programable (sin aplicación de código) XBee S2C TH. Está configurado como: AP1, CE1, ID<fijado>, NICOORDINADOR, EE1, KY0CFE00D1, JV0, BD7.

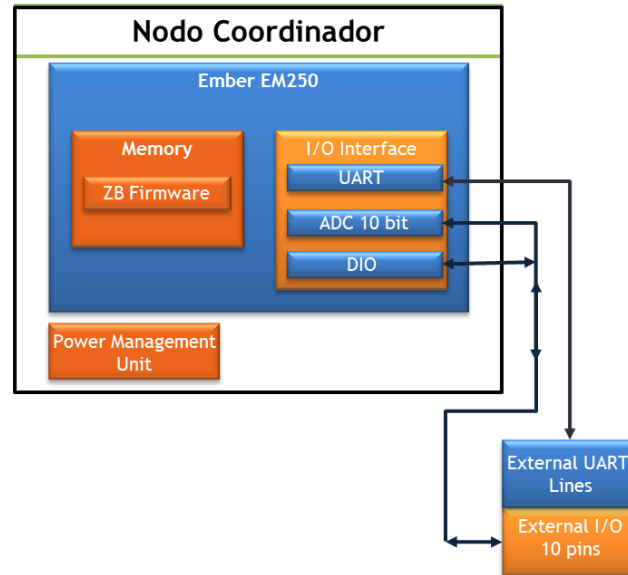


Fig. 23: Diagrama del nodo coordinador.

- Nodo remoto:** el radio remoto es un XBee programable S2C. Hay dos diferentes firmwares para este módulo, uno para el remoto programable y otro para el remoto XBee. El remoto XBee está configurado como: AP1, CE0, ID0, NIREMOTO, EE1, KYOCFE00D1, NW10E0, JV1, BD7.

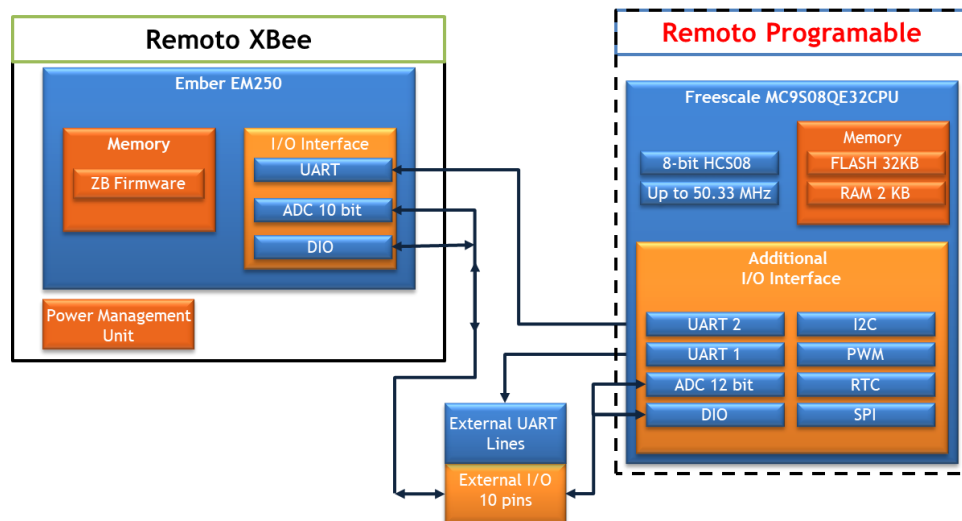


Fig. 24: Diagrama del nodo remoto.

- Medidor Eléctrico:** el medidor eléctrico tiene su transceptor de infrarrojos conectado a la UART serial del radio remoto corriendo a 2400 baudios 7 bits Paridad Even.
- Nodo Repetidor:** repetidor es un radio programable (sin aplicación de código) XBee S2C. Está configurado como AP1, CE0, ID0, NIREPITADOR, EE1, KYOCFE00D1, JV1, BD7.

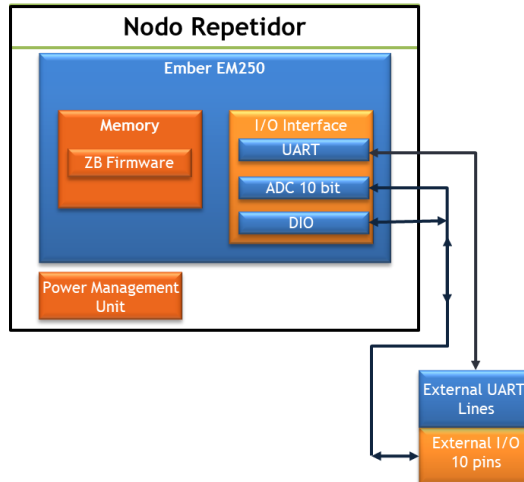


Fig. 25: Diagrama del nodo repetidor.

4.4.3. Trafico

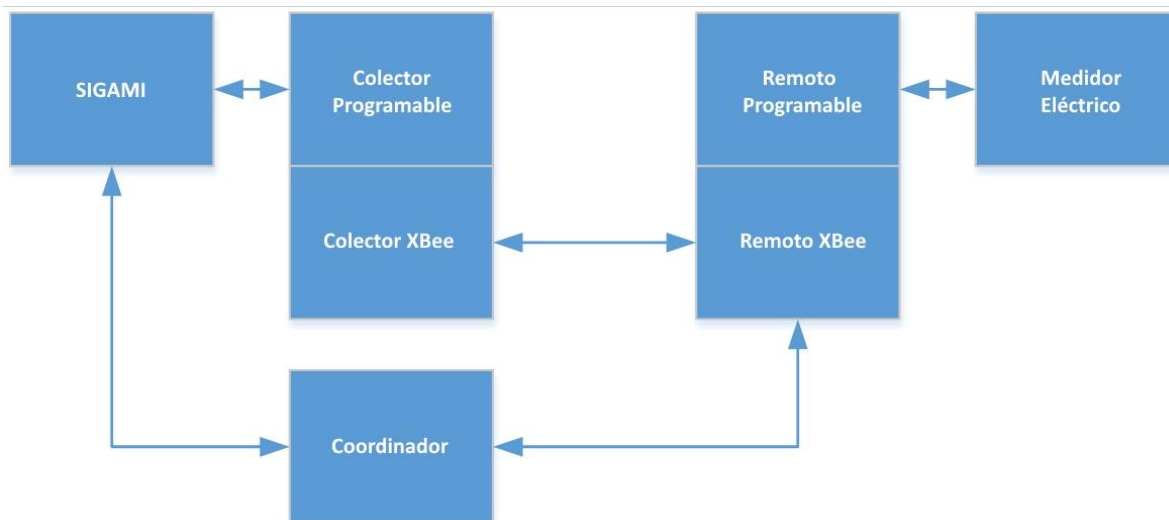


Fig. 26: Interfaces de comunicación

4.4.3.1. SIGAMI – COLECTOR

- **SIGAMI – Colector Programable:** el SIGAMI y 240 colectores programables se comunican a través de un largo enlace de 400MHz que se convierte en una conexión UART serial con cada colector programable.
- **Colector Programable – Colector XBee:** un colector programable y un colector XBee se comunican a través de una conexión serial UART.
- **Colector XBee – Remoto XBee:** el colector se comunica con los 750-1000 nodos Remotos XBee de la red a través de un enlace de RF en la banda ISM de 2.4 GHz.
- **Remoto XBee – Remoto Programable:** un Remoto XBee y un Remoto Programado están comunicados a través de su puerto serial UART.



- **Remoto Programable – Medidor eléctrico:** el Remoto Programable y el medidor eléctrico están comunicados a través de una conexión UART a 2400 baudios. Después se establece una conexión entre el SIGAMI y el radio remoto programable durante un sondeo de datos, la comunicación es accionada por un DLL IUSA que reside en el SIGAMI. El software IUSA DLL es responsable de la autenticación, cifrado, y lectura del medidor eléctrico.
- **Repetidor XBee:** los XBees repetidores son módulos XBee programables que no ejecutan una aplicación y que no están conectados a un medidor eléctrico, pero se posicionan y configuran para ayudar a redirigir los mensajes a través de la red.

4.4.3.2. SIGAMI – COORDINADOR: el SIGAMI se comunica hasta con 240 coordinadores, la comunicación es a través de un largo enlace de 400 MHz que se convierte en una conexión UART serie con cada coordinador.

- **Coordinador - XBee remoto:** El coordinador se comunica con los 750-1000 XBees remoto de la red a través de un enlace de radiofrecuencia en la banda ISM de 2,4 GHz.

4.4.4. Administración de redes

- **Unión del radio remoto a una Red.**

Los nodos Coordinadores son puestos en marcha para crear las diferentes redes encriptadas ZigBee. El Radio Remoto busca una red con la que pueda unirse y realiza la unión cuando recibe una respuesta de asociación de alguno de los Coordinadores.

- **Notificación de unión a una red del radio Remoto.**

Después de que un Radio Remoto se une a una red, el SIGAMI puede recibir un mensaje Device_Annce del Coordinador y del Colector como una notificación de anuncio. Debido a que el mensaje Device_Annce es una emisión (generada por la capa de red de la XBee remoto), no hay garantía de que llegue o bien el Coordinador o Colector reciban el mensaje de Device_Annce. Después de recibir una Device_Annce mensaje, el SIGAMI debe actualizar el registro de estado de la red obteniendo del mensaje de anuncio la dirección de 64 bits y la de 16 bits. Y almacenarla para posteriormente conocer la ruta de poleo de cada uno de los radios. El SIGAMI utilizará esta información de encaminamiento para actualizar la tabla de enrutamiento que utilizará a través de los Colectores, antes de comunicarse con un Radio remoto.

Para garantizar el SIGAMI recibe una notificación de una nueva unión de un radio remoto, después de unirse, el Radio remoto envía el mensaje: JOINED < 64addr > < 16addr \n

A continuación, el SIGAMI debe enviar a través del Colector al Radio Remoto como un acuse de recibo para que el Radio Remoto detenga el proceso de anuncio JOIN_ACK < 64addr > < 16addr > < ruta > \n

- **Transferencia de un radio remoto a otra red.**

El SIGAMI a través de un comando remoto puede transferir un Radio Remoto de una red a otra red vecina. Para transferir un radio remoto desde una red a otra, se debe enviar el comando: `TRANSFER< Node Identifier > / < PANID > \n`.

Después de que ha dejado la red el Colector informará al SIGAMI con la siguiente información: `TRANSFER_RSP < Node Identifier > \n`.

El SIGAMI debe utilizar este mensaje para actualizar el estado de la línea. El radio se anunciará en la nueva red, y se deberá seguir el procedimiento descrito en la sección anterior.

- **Remove un radio remoto de una red.**

El comando para remover un Radio remoto es el siguiente: `LEAVE<64addr><16addr>\n`.

Si es exitosa la transacción, el remoto responderá con el siguiente mensaje: `LEFT<64addr><16addr>\n`.

El instalador debe tener cuidado al retirar el Radio remoto de tal manera que después de haberla apagado y no debería ser energizado de nuevo hasta moverlo físicamente. Debido a que si no se mueve y se vuelve a energizar se intentara unirse a una red local de nuevo.

- **Poleo de los radios Remotos.**

El SIGAMI debe recibir una `HOLA \n` del Colector por lo que sabrá está listo para iniciar la comunicación. El SIGAMI debe enviar: `POLL< Node Identifier>\n`.

Después que el Colector ha establecido una conexión con el radio remoto responderá con: `CONECTADO \n`.

A continuación, el SIGAMI puede utilizar la DLL IUSA para comunicarse con el medidor en forma transparente.

- **Programación por Aire (OTA Over-the-air programming)**

Hay 5 versiones de Firmware los cuales se pueden actualizar por el sistema de actualización para:

- Coordinador
- Colector Programable
- Colector XBee
- Remote Programable
- Remote Xbee

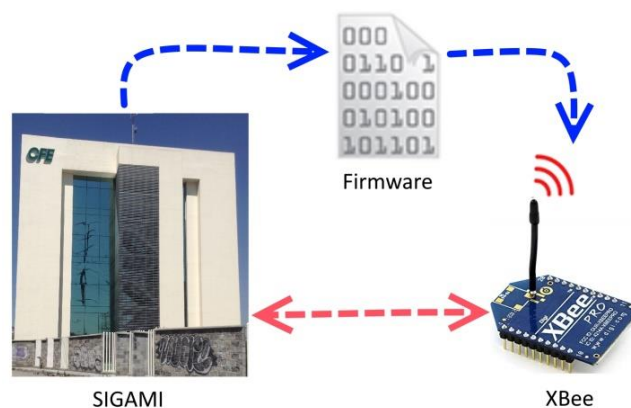


Fig. 27: Programación por aire.

4.5. Fase 5: Ensamble e integración

El ensamble e integración de las tarjetas electrónicas al medidor eléctrico se llevó a cabo en líneas de ensamble en donde cada línea entregaba alrededor de 3,840 medidores por semana. En cada línea de ensamble se contaba con un ingeniero electrónico responsable en conjunto con un supervisor para una revisión exhaustiva del medidor.

El ensamble de la tarjeta electrónica en el medidor eléctrico se llevó a cabo en las siguientes estaciones:

4.5.1. Estación 1 Desarmado De Medidores:

Las actividades realizadas fueron las siguientes:

- Abrir las cajas que contienen los medidores eléctricos, retirar de la parte de arriba los aros y acomodarlos en la parte de inferior de la caja.
- Realizar el desarmado del medidor, retirar cubierta, empaque y protector solar.
- Quitar los cuatro tornillos que unen el protector solar al PCB.
- Acomodar los medidores en su caja correspondiente, armar la tarima y suministrar los medidores a la siguiente estación.

Esta operación requirió de 6 operadores.

4.5.2. Estación 2 y 3 Estación de soldadura:

- En estas estaciones, se realizaron las actividades de soldadura correspondientes para las tarjetas electrónicas y para los medidores eléctricos.
- Se superviso que el personal aplicara correctamente la soldadura en todas las tarjetas electrónicas y en los puntos de soldadura de los medidores, así como también realizar las reparaciones correspondientes a los medidores que lo requirieron.

Esta operación requirió de 6 operadores.



Fig. 28: Estación de soldadura.

4.5.3. Estación 4 Instalación de radio:

Las actividades para esta estación fueron las siguientes:

- Realizar el escaneo de radio-medidor para vincular el nombre del medidor con el NI del radio.
- Ensamblar el radio XBee en tarjeta electrónica.
- Supervisar todos los ensambles realizados.

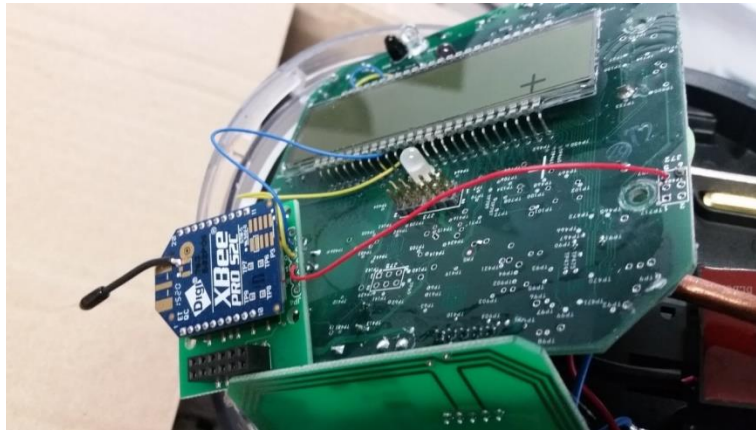


Fig. 29: Ensamble de radio XBee en Medidor eléctrico.

4.5.4. Estación 5 Armado de Medidores:

- Atornillar el PCB al protector solar
- Armar el protector solar y colocar empaque.
- Colocar etiquetas RF y hacer el ensamble a presión de la cubierta del medidor.

4.5.5. Estación 6 Pruebas (tableros):

Actividades para esta estación:

- Realizar prueba de calidad y funcional en tableros 1 y 2.



Fig. 30: Tablero de pruebas.

4.5.6. Estación 7 Sellado y Escaneado:

- Sellado de los medidores después de pasar exitosamente pruebas.
- Escanear los medidores sellados.

4.5.7. Estación 8 Emplaye:

- Realizar el acomodo y distribución de tarimas y cajas por toda la línea de ensamble.
- Emplayar las tarimas una vez que estén escaneadas.

5. RESULTADOS Y APORTACIONES

5.1. Asimilación tecnológica a nivel personal (certificaciones)

Para llevar a cabo el proyecto fue necesario aplicar los conocimientos adquiridos en la carrera, así como también recibir capacitación por parte del fabricante de los módulos de radio frecuencia XBee-PRO® Programmables.

- Certificate of Achievement **Digi RF Field Engineer Training Program**. 23 de Marzo – 27 de Marzo, 2015 UTAH, UT USA.
- Certificate of participation **Latin America | IoT CONFERENCE** 30 de Agosto – 1 de Septiembre, 2016 Minnetonka, MN USA.
- Certificate of Completion **Digi XBee-PRO® Programmable Training from Digi International** 8 de Agosto – 10 de Agosto, 2017 Minnetonka, MN USA.



Fig. 31: Capacitación Digi RF Field Engineer.



Fig. 32: Capacitación Digi RF Field Engineer.

5.2. Capacitación al personal de la empresa proveedora del servicio de energía eléctrica. (Taller “Radios Digi® XBee / Protocolo ZigBee”)

- Fue necesario capacitar a ingenieros responsables de las diferentes divisiones de la empresa proveedora del servicio eléctrico con la finalidad de hacer más ágil la implementación del proyecto.
- La duración del curso fue de diez días y se impartió en la Universidad Tecnológica CFE en Tultitlán, Estado de México.



Fig. 33: UTEC CFE Lechería.

5.3. Pruebas de laboratorio en UTEC CFE lechería (Universidad Tecnológica).

Aprovechando lo amplio de las instalaciones, se realizaron las diferentes pruebas de comunicación y de alcance a una pequeña red ZB con 200 nodos remotos equipados con medidores eléctricos, 5 nodos colectores y 5 coordinadores.

Se verifico lo siguiente:

- La creación de la red en malla.
- El alcance extendido al saltar los datos de nodo a nodo.
- La capacidad de “autocuración” que es la capacidad para crear rutas alternas cuando un nodo falla o pierde conexión.



Fig. 34: Tableros para pruebas con 192 medidores eléctricos.

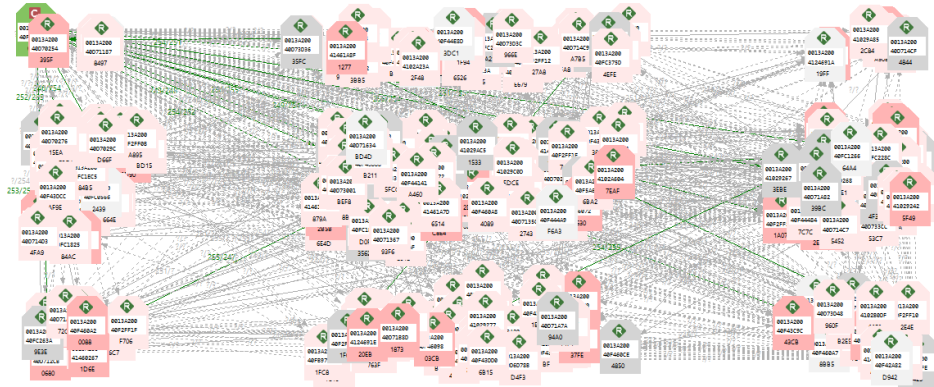


Fig. 35: Descubrimiento de nodos, imagen arrojada por el software X-CTU de Digi.

5.4. Pruebas en campo con 1000 nodos remotos (Los Encinos, Zumpango de Ocampo, Estado de México.)

La prueba final decisiva para validar el proyecto fue llevarlo a cabo en un ambiente real, es decir tomar lecturas remotas de medidores eléctricos instalados en casa habitación, para ello el cliente sugirió hacerlo en el fraccionamiento los Encinos ubicado en Zumpango estado de México.

El resultado de las pruebas no fue del todo exitoso ya que se presentaron problemas que en el laboratorio jamás aparecerían tal es el caso de los cambios climáticos (condiciones ambientales).

- Al estar los medidores eléctricos a la intemperie ocasiona que los rayos de sol los golpeen directamente provocándoles un **aumento en su temperatura interna hasta 70°C**, ocasionando la falla en el microprocesador del módulo de comunicación XBee, una solución rápida para el problema fue bajar la frecuencia de operación del microcontrolador de 48MHz a 38MHz. El fabricante determinó que había una falla en el Hardware de la radio misma que le dio solución para que cumpliera con las especificaciones mencionadas en la hoja de datos técnicos (rango de temperatura de -40 a 85 ° C).
- La **interferencia** fue otro factor muy importante, salir de las bandas congestionadas, impulsar el enlace con receptores más sensibles y transmisores de mayor potencia fueron algunas de las medidas que se tomaron para atacar este problema.
- **Nodos que no se asocian** (tráfico excesivo al iniciar), cuando los nodos remotos son energizados al mismo tiempo se tenía el problema que no todos podían unirse a la red, debido a que tienen un tiempo finito para unirse, en este tiempo deberán mandar la petición al coordinador y el coordinador deberá asignarles una dirección de red de 16 bits, el problema se solucionó agregando la siguiente rutina al código fuente:

```
do {
    sys_watchdog_reset();
    sys_xbee_tick();
    p++;
    delay_ticks(3);
    if (p==25000){sys_reset(BL_CAUSE_NOthing);}
} while (!joined);
```


Empieza un bucle infinito del cual solo podrá salir si la conexión del nodo remoto con el coordinador ha sido exitosa.

- **Nodos perdidos**, hubo ocasiones en las que los enlaces de los nodos remotos eran muy pobres y llegaban a perderse, para recuperar esos nodos fue necesario agregar nodos repetidores a la red para reforzar los enlaces y los nodos remotos pudieran escuchar al nodo colector, ya que solo había uno por red y era su dirección la que guardaban en memoria al momento de iniciar su programa. Una desventaja en las primeras versiones del programa era precisamente que los nodos remotos solo contestaban al nodo colector con el que estaban enlazados, si por alguna razón el colector fallaba, prácticamente era imposible lograr que los nodos se cambiaran al nuevo colector, la única solución era desenergizándolos. Como solución se propuso modificar las líneas del código para lograr agregar varios nodos colectores a la red y que los nodos remotos pudieran obedecer a cualquiera que los encueste, logrando así tener varios enlaces de la central con los nodos remotos, y dependiendo las pruebas de rango establecer que colector le acomoda mejor a cada nodo remoto.
- **Actualización de Firmware** (Freescale App). La actualización de firmware principalmente en los nodos remotos fue otra gran problemática ya que hubo muchos cambios en la programación debido a mejoras o a correcciones en la ejecución del programa y que debían hacerse a los 1000 nodos contenidos en la red, retirar los medidores para programar uno a uno no era una opción válida, el cliente solicitó que todas las actualizaciones pudieran hacerse de manera remota desde su servidor SIGAMI. Por lo que se desarrolló una aplicación con nombre “single_ota_update.exe” Esta aplicación toma todos los parámetros por la línea de comandos (puerto serie, baudrate, fichero binario, password, NI del radio objetivo), programa el primer radio y se sigue con los demás uno a uno hasta terminar una lista previamente guardada, arroja el mensaje “Upload completed successful” cada que una radio ha sido programada exitosamente.

```
Administrador: C:\Windows\System32\cmd.exe
C:\>cd OTA_Ultimo
C:\OTA_Ultimo>fw_update.bat -sCOM35 -b115200 -pota_password -f"C:\CFE_REMOTE_U2.
abs.bin"
04/06/2015:13:40:44.19 Updating module "769Y4H"
COM35
Address:0013a200-408d2513 0x0000 PARENT:0xffff Coord NI:[ ]
Address:0013a200-408ca143 0xec22 PARENT:0xffff Router NI:[769Y4H]
Starting xmodem upload of
C:\CFE_REMOTE_U2.abs.bin
28224 bytes
Reached end of file, closing connection
Upload completed successful
04/06/2015:13:40:44.19 Updating module "809Y0H"
COM35
Address:0013a200-408d2513 0x0000 PARENT:0xffff Coord NI:[ ]
Address:0013a200-406fe463 0x5039 PARENT:0xffff Router NI:[809Y0H]
Starting xmodem upload of
C:\CFE_REMOTE_U2.abs.bin
28224 bytes
Reached end of file, closing connection
Upload completed successful
C:\OTA_Ultimo>
```

Fig. 36: Programación por OTA (Over-the-air programming).

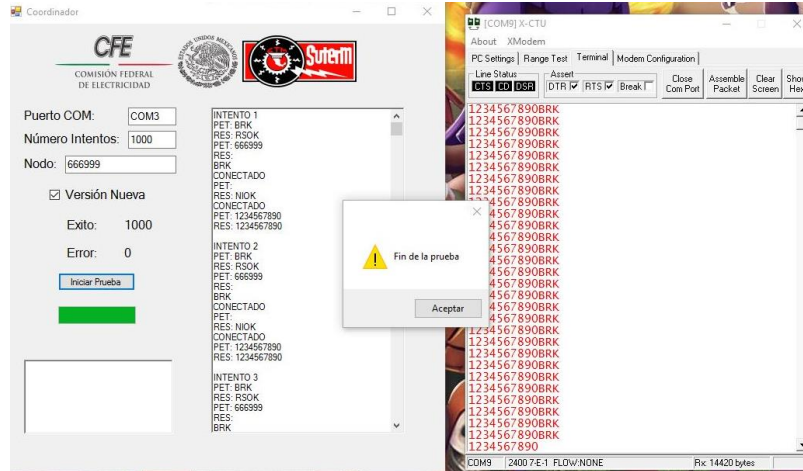


Fig. 37: Pruebas de comunicación a los 1000 nodos remotos.

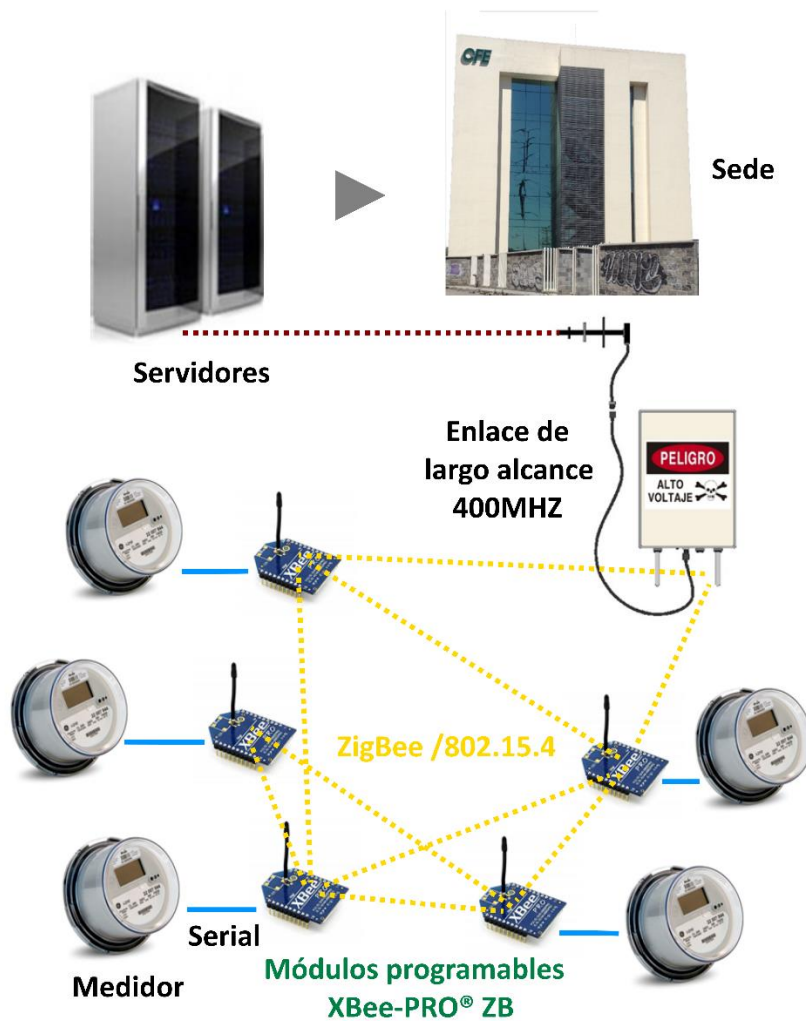


Fig. 38: Diagrama a bloques del sistema.



Fig. 39: Polígono Zumpango.

5.5. Validación del proyecto por parte de fabricante del radio XBee y de la empresa desarrolladora del proyecto.

A pesar del buen funcionamiento de la red y de los favorables resultados obtenidos en las diferentes pruebas aplicadas, el cliente solicitó que un experto en ZigBee revisara el proyecto y le diera el visto bueno, por lo que el fabricante de los Radios XBee se ofreció a facilitar un equipo de ingenieros norteamericanos especialistas en la materia. La revisión duró 5 días y la determinación de los ingenieros fue que la red cumple satisfactoriamente con todos los requerimientos funcionales del cliente. De esta manera, el cliente validó el proyecto y giró la orden de compra para replicar el proyecto.

5.6. Implementación piloto del sistema con 180 000 nodos remotos (Atizapán, Ciudad Azteca, Basílica, Ecatepec, Naucalpan, Tlalneptla)

Descrito en el apartado número 4.



CONCLUSIONES

La infraestructura desarrollada cumple satisfactoriamente los requerimientos funcionales del cliente, esta infraestructura permite que grandes cantidades de información se distribuyan al interior de la empresa proveedora del servicio eléctrico, haciendo sus operaciones más ágiles y con mayor respuesta a sus clientes.

Con este sistema se puede medir, recolectar y analizar el uso de la energía e interactuar con los medidores inteligentes de electricidad de manera remota.

La integración tecnológica a los medidores le permite al cliente registrar el consumo en los hogares y ya no se requiere de la medición en el sitio de un encargado de la empresa, pues la lectura, el corte y la reconexión se hace vía remota desde su sistema de facturación.

Los beneficios de este sistema son el acceso oportuno a la información de electricidad de la vivienda o local, lo que ayudará a mejorar los hábitos de consumo y contribuyen a la disminución en las tarifas del servicio al reducir los costos por conexión y desconexión.

Recomendaciones:

Este sistema podría ser utilizado para realizar un balance comparativo de energía entre el transformador y la suma de los medidores y en caso de que no empaten, emitir una alarma a la empresa como detección de la pérdida o robo.

Las redes inalámbricas implican un gran intercambio de información con un mínimo esfuerzo de instalación. Adicionalmente el costo de transmisores ZigBee, es bastante bajo por lo que se recomienda al cliente escalar este proyecto a nivel nacional, ayudaría a combatir el tema de las pérdidas no técnicas de energía eléctrica y a su vez incrementar la eficiencia de la distribución de la energía eléctrica.



REFERENCIAS

1. HUERTA, E.V., *Documentación de los procesos involucrados en el flujo del material en el almacén de la empresa AG electrónica S.A de C.V.*, in *Unidad profesional interdisciplinaria de ingeniería y ciencias sociales y administrativas* 2010, Instituto Politécnico Nacional México D.F. p. 70.
2. AG, E. *¿Quiénes somos?* 2018 [cited 2018; Available from: https://agelectronica.com/vs/quienes_somos.php.
3. MORENO, J.M. *Informe Técnico: Protocolo ZigBee (IEEE 802.15.4)*. 2007; Available from: <https://docplayer.es/16474763-Informe-tecnico-protocolo-zigbee-802-15-4-indice.html>.
4. ACOSTA, F., *Feasibility and Challenges.*, in *Regional Conference on Smart Grids in Latin America and Caribbean*, CEPAL, Editor 2010, Sector Energético Mexicano: Santiago de Chile. p. 12-13.
5. RODRÍGUEZ, R.L. *Tendencias en medición "Detección de robos de energía eléctrica"*. 1997; Available from: <https://www.ineel.mx/publica/bolja97/tenja97.htm>.
6. HERNANDEZ, M.P., *Modelo para detectar y prevenir pérdidas no técnicas en sistemas de distribución eléctrica con base en técnicas de minería de datos y redes bayesianas*. Boletín IIE, 2015. **39**(4): p. 180-200.
7. mvelectronica. *Modulo Xbee s2c Transceptor Con Antena*. 2018; Available from: <https://www.mvelectronica.com.mx/products/modulo-xbee-s2c-transceptor-con-antena/>.



GLOSARIO

dBm	decibel-milliwatt.
EUI64	Dirección única extendida (Dirección MAC)
GPS	Sistema de Posicionamiento Global.
LoS	(Line of Sight) Línea de vista. La ruta física más corta entre dos radios.
MAC Address	Un valor único de ocho bytes para cada radio RF asignado en el momento de fabricación. Generalmente se expresa en términos de dígitos hexadecimales.
Net Address	Un valor de dos bytes asignados a un radio de RF en asociación con una red ZigBee. Generalmente se expresa en términos de dígitos hexadecimales.
OTA	Over the Air (Programación por aire).
PAN	Personal Area Network (Red de Area Personal).
PAN Id	Identificador de Red de Área Personal. Un valor de 8 bytes expresa generalmente como dígitos hexadecimales.
SIGAMI	Servidor Central para el Sistema.
QoS	Calidad de servicio. Si una radio puede comunicar de forma fiable con otro, entonces ese recorrido se puede decir que tienen buenas QoS, de lo contrario, no.
WSN	Wireless Sensor Network (Red inalámbrica de sensores)
WPAN	Wireless Personal Area Network (Redes Inalámbricas de Área Personal)
ISM	(Industrial, Scientific and Medical) son bandas reservadas internacionalmente para uso no comercial de radiofrecuencia electromagnética en áreas industrial, científica y médica.
ZB	ZigBee