

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA
Y TELECOMUNICACIONES**

**PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE INGENIERÍA**

**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE RED
INALÁMBRICA SENSORIAL IMPLEMENTADA
CON LA TECNOLOGÍA ZIGBEE PARA
MONITORIZACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA.**

**ANA BELÉN ALBARRACÍN SAMANIEGO
DAYSI XIMENA CONTERO ROSERO**

SALGOLQUÍ – ECUADOR

2012

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente proyecto de grado: “Desarrollo de un Prototipo de Red Inalámbrica Sensorial Implementada con la Tecnología Zigbee para la Monitorización de la Calidad del Agua”, fue desarrollado en su totalidad por las Señoritas, Ana Belén Albarracín Samaniego con CI: 1713581781 y Daysi Ximena Contero Rosero con CI: 1716512049, bajo nuestra dirección.

Atentamente,

Ing. Rodolfo Gordillo

DIRECTOR

Ing. Paúl Bernal

CODIRECTOR

DEDICATORIA

A mis ángeles de la guarda, mi padre Luis Albarracín y mi abuelita Leonor, personas muy valiosas que dejaron en mi corazón un gran legado y que no dejaré de extrañar jamás.

A las personas maravillosas que conforman mi familia, quienes con su amor incondicional y apoyo diario me dan la inspiración y la fuerza para poder superarme.

Ana Belén Albarracín Samaniego

Dedico el presente trabajo a mi madre Meibol quien con su paciencia y aliento luchó conmigo día a día para verme cumplir esta meta, a mi padre Victor por su apoyo y el valor mostrado para salir adelante, a mis hermanos queridos Priscila y Josué por su constante amor y por ser mi apoyo incondicional.

También se lo dedico al resto de mi familia y amigos que fueron parte de mi crecimiento durante esta etapa de mi vida, por su afecto y preocupación que me sirvieron de mucho para lograr mis objetivos.

Este trabajo que costo tiempo, dinero y sacrificio se los dedico a todos ustedes porque los quiero y aprecio.

Daysi Ximena Contero Rosero.

AGRADECIMIENTO

A Dios por cuidarme en todo momento y ser esa fuerza espiritual que llena mi vida de bendiciones y me impulsa a superarme.

A mi madre y mi hermana, personas que día a día me enseñan lecciones de vida y con su amor y entrega me han sabido guiar en el camino. Es imposible expresar con palabras el amor y agradecimiento que tengo hacia ustedes.

A mis amigos y amigas, que con sus sonrisas me animaron siempre a ser mejor persona e hicieron de mi vida universitaria una experiencia inolvidable. Su cariño permanecerá en mí para siempre.

A nuestro asesor de proyecto en el Tecnológico de Monterrey Dr. Carlos Mex, quien nos abrió las puertas y nos ayudó incluso en circunstancias difíciles, motivándonos a alcanzar nuestras metas.

Ana Belén Albarracín.

A Dios por haberme permitido llegar hasta este punto y darme la vida para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mi familia, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, por sus ejemplos de perseverancia y constancia, por sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien y más que nada por su amor incondicional.

A mi compañera de tesis Anita por el apoyo y esfuerzo brindado en todas las etapas de este proyecto.

A las autoridades y docentes de la Escuela Politécnica del Ejército quienes fueron mi guía y ejemplo durante mi carrera.

A los profesores del Instituto Tecnológico de Monterrey, Dr. Carlos Mex y el Dr. Ramón Rodríguez por brindarnos su dirección, hospitalidad y amistad durante nuestra estancia en México para el desarrollo de este proyecto.

Daysi Contero

RESUMEN

El presente proyecto presenta el diseño e implementación de un sistema de monitorización de la calidad del agua en la planta de tratamiento de aguas residuales del Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey. Este sistema cuenta con una red inalámbrica de sensores para la cual se ha utilizado módulos de comunicación basados en tecnología Zigbee.

El proyecto consiste en tres etapas principales: etapa de instrumentación, creación de la red inalámbrica y el desarrollo de la interfaz de usuario. La primera radica en el diseño y construcción de los circuitos de acondicionamiento de las señales provenientes de los sensores de pH, oxígeno disuelto y temperatura. Posteriormente se desarrolló la WSN (Wireless Sensor Network) utilizando el kit de desarrollo Xbee Znet 2.5. La interfaz de usuario fue elaborada en Labview™ para visualización de los datos, presentación de gráficas, acceso al servidor de iDigi™, presentación de alarmas para advertir características contaminantes en el agua y la presentación de datos históricos ordenados por hora y fecha.

Como resultado de esta investigación se obtuvo una publicación “Consideraciones Esenciales para el Diseño de Redes Zigbee”, al que se hace referencia a lo largo de este documento. Finalmente se efectuaron las pruebas de funcionamiento del sistema: alcance, precisión, comunicación, consumo de energía y costos de implementación.

ABSTRACT

This work presents the design and implementation of a system for monitoring water quality in the plant's wastewater treatment Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey. This system features a wireless sensor network for which it has been used based communication modules Zigbee technology.

The project consists of three main stages: implementation stage, creating the wireless network and the development of the user interface. The first lies in the design and construction of the conditioning circuits of the signals from the sensors of pH, temperature and dissolved oxygen. Subsequently developed the WSN (Wireless Sensor Network) using the Xbee Znet SDK 2.5. The user interface was developed in LabVIEW™ for data visualization, presentation graphics, iDigi™ server access, presentation of alarms to warn contaminants in water characteristics and presentation of historical data sorted by time and date.

As a result of this investigation was obtained a publication "Essential Considerations for Zigbee Network Design", referred to throughout this document. Finally tests were conducted Operation System: range, accuracy, communication, power consumption and implementation costs.

INDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
PRÓLOGO	v
INDICE DE FIGURAS	x
INDICE DE TABLAS	xii
GLOSARIO	xii
CAPITULO I	1
PRESENTACIÓN DEL PROYECTO	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA	2
1.3 ORGANIZACIÓN DEL PROYECTO	3
CAPITULO II	5
ESPECIFICACIÓN ZIGBEE Y ESTÁNDAR IEEE 802.15.4	5
2.1 CRONOLOGÍA	5
2.2 DEFINICIÓN.....	5
2.3 TIPOS DE DISPOSITIVOS	6
2.4 ARQUITECTURA.....	7
2.5 PROTOCOLOS	9
2.6 TOPOLOGÍA DE ZIGBEE	10
2.8 BANDAS DE OPERACIÓN	11
2.8.1 Interferencia con Wi-Fi®	12
2.9 MODO AHORRO DE ENERGÍA.....	13
2.10 MATERIALES UTILIZADOS.....	14
CAPITULO III	18
DISEÑO DEL PROTOTIPO	18
3.1 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA.....	18
3.2 ARQUITECTURA DEL SISTEMA.....	19
3.4 DISEÑO DEL SISTEMA	21
3.4.1 Diseño de la red Zigbee	21

a. Topología de Red	21
3.4.2 Diseño de los circuitos de acondicionamiento de señales.....	24
a. Circuito de acondicionamiento para el Sensor de Ph.....	24
b. Circuito de Acoplamiento para el Sensor de Oxígeno Disuelto.....	27
c. Circuito de Acoplamiento para el Sensor de Temperatura.....	29
3.4.3 DISEÑO DE LA INTERFAZ DE USUARIO.....	29
CAPITULO IV	31
DESARROLLO DEL PROTOTIPO	31
4.1 CONFIGURACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE RED	31
4.1.1 CONFIGURACIÓN DEL DISPOSITIVO COORDINADOR	31
4.1.2 CONFIGURACIÓN DEL DISPOSITIVO ENRUTADOR	32
4.1.3 CONFIGURACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS FINALES	34
4.2 PROGRAMACIÓN PARA GESTIÓN DE RED (PYTHON)	36
4.3 PROGRAMACIÓN DE LA INTERFAZ DE USUARIO (LABVIEW™).....	40
4.3.1 DESCRIPCIÓN DE PANTALLAS	42
4.4 INTEGRACIÓN DEL SISTEMA	44
4.4.1 Dispositivo Final 1.....	44
4.4.2 Dispositivos Finales 2 y 3.....	45
4.4.3 Dispositivo enrutador.....	47
4.4.4 Dispositivo coordinador.....	48
4.4.5 Integración del Software.....	48
CAPITULO V.....	50
PRUEBAS Y RESULTADOS	50
5.1 PRUEBAS DE COMUNICACIÓN.....	50
5.1.1 Prueba de alcance de dispositivos.....	50
5.1.2 Pruebas de Inicio de Red.....	51
5.2 ADQUISICIÓN DE DATOS	58
5.3 VALIDACIÓN DE DATOS.....	60
5.3.1 Calibración del sistema.....	60
5.3.2 Recolección de datos	61
5.4 ANÁLISIS DE CONSUMO DE ENERGÍA	62
5.3 ANÁLISIS DE COSTOS.....	66
CAPITULO VI.....	67

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	686
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70
ANEXO 1.....	71
CODIGO DE PROGRAMA PYTHON™ COORDINADOR.....	71
ANEXO 2.....	76
PUBLICACIÓN ARTÍCULO TÉCNICO.....	76
ANEXO 3.....	86
DIAGRAMA CIRCUITO ACONDICIONAMIENTO OD.....	86
DIAGRAMA CIRCUITO ACONDICIONAMIENTO PH.....	87
ANEXO 4.....	88
ESQUEMA CIRCUITAL TARJETA INTERFAZ	88
ANEXO 5.....	89
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS MÓDULOS XBEE.....	89
ANEXO 6.....	90
HOJAS TÉCNICAS DE LOS SENSORES.....	90

INDICE DE FIGURAS

CAPITULO II

Figura 2.1 Tipos de dispositivos de IEEE 802.15.4 y Zigbee.....	6
Figura 2.2 Capas de Red que conforma la especificación Zigbee	7
Figura 2.3 Topologías de Red Zigbee	10
Figura 2.4 Banda de frecuencia IEEE 802.11 y Zigbee.....	12
Figura 2.5. Uso de los períodos de silencio de Wi-Fi®	13
Figura 2.6 Tarjeta <i>Xbee</i> Series 2	15
Figura 2.7 Tarjeta <i>Xbee</i> Series2 PRO	15
Figura 2.8 ConnectPort X4	16
Figura 2.9 Sensor de pH.....	19
Figura 2.10 Sensor de OD.....	19

CAPITULO III

Figura 3.1 Ubicación de los dispositivos finales en las planta de tratamiento.....	21
Figura 3.2 Arquitectura del Sistema.....	22
Figura 3.3 Topología de red.....	24
Figura 3.4 Gráfica de Nivel de pH vs Voltaje de salida del Sensor.....	27
Figura 3.5 Circuito de acoplamiento de señal del sensor de pH.....	27
Figura 3.6 Circuito de acoplamiento de señal del sensor de OD.....	30

CAPITULO IV

Figura 4.1 Software X-CTU e interfaz Web para configuración de dispositivos.....	33
Figura 4.2 Captura de pantalla del software <i>DigiESPTM for PythonTM</i>	37
Figura 4.3 Diagrama de flujo del código de programación <i>batterys.py</i> Python TM	39
Figura 4.4 Diagrama de bloques de la interfaz de usuario.....	40
Figura 4.5 Autenticación al servidor de <i>iDigiTM</i>	41
Figura 4.6 Primera pantalla de interfaz de usuario en Labview TM	42
Figura 4.7 Segunda pantalla de la interfaz de usuario en Labview TM	43
Figura 4.8 Tercera Pantalla de la Interfaz de usuario en Labview TM	43
Figura 4.9 Pantalla de históricos de alarmas en la interfaz de Labview TM	44
Figura 4.10 Diagrama de bloques del dispositivo final 1.....	45
Figura 4.11 Diagrama de bloques de los dispositivos finales 2 y 3.....	46
Figura 4.12 Integración de los módulos remotos.....	47
Figura 4.13 Diagrama de bloques dispositivo enrutador.....	48
Figura 4.14 Integración del nodo coordinador.....	49
Figura 4.15 Integración de un computador para la interfaz de usuario.....	49

CAPITULO V

Figura 5.1 Prueba de alcance mediante X-CTU.....	50
Figura 5.2 Alcance de dispositivos.....	52
Figura 5.3 Espectro de frecuencias Zigbee.....	53

Figura 5.4 Envío de tramas beacon request y beacon.....	53
Figura 5.5 Identificación de PANs.....	53
Figura 5.6 Indicador de asociación.....	55
Figura 5.7 Descubrimiento de nodos desde la interfaz de coordinador.....	55
Figura 5.8 Captura de tramas con seguridad.....	56
Figura 5.9 Transmisión de datos desde los dispositivos finales.....	57
Figura 5.10 Interfaz de verificación de conexión al servidor.....	57
Figura 5.11 Consola para enlace con el servidor <i>iDigi cloud</i>	58
Figura 5.12 Captura de archivo de datos del Dispositivo1 en el servidor.....	59
Figura 5.13 Validación de datos con otro sistema.....	60
Figura 5.14 Consumo de corriente.....	61

INDICE DE TABLAS

CAPITULO III

Tabla 3.1 Rangos de valores requeridos.....	32
---	----

CAPITULO IV

Tabla 4.1 Parámetros de configuración para en nodo coordinador.....	33
Tabla 4.2 Parámetros de configuración para el nodo enrutador.....	33
Tabla 4.3 Parámetros de configuración para los nodos finales	34
Tabla 4.4 Funciones de escalamiento para temperatura, pH y OD.....	36

CAPITULO V

Tabla 5.1 Validación de datos con el sistema actual.....	58
Tabla 5.2 Calibración del sistema.....	59
Tabla 5.3 Corriente consumida por el dispositivo final.....	61
Tabla 5.4 Corriente consumida por el modulo medidor de pH.....	62
Tabla 5.5 Corriente consumida por el módulo medidor de OD.....	62
Tabla 5.6 Corriente promedio y tiempo de autonomía de baterías.....	63
Tabla 5.7 Corriente promedio y tiempo de autonomía con baterías industriales.....	63
Tabla 5.8 Costos de ejecución del sistema.....	64

GLOSARIO

ACK	Reconocimiento (Acknowledgement)
APS	Subnivel de soporte a la aplicación (Application Support Sublayer)
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
ED	Dispositivo final (End Device)
FFD	Dispositivo de funcionalidad completa (Full-Function Device)
ISM	Banda de frecuencia usada para fines industriales, científicos y médicos.
MAC	Capa de control de acceso al medio (Medium Access Control layer)
MCU	Multipoint Control Unit
OEM	Original Equipment Manufacturer
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
PAN	Red de área personal (Personal Area Network)
PHY	Capa física (Physical layer)
RF	Radio frecuencia (Radio Frequency)
RFD	Dispositivo de funcionalidad reducida (Reduced-Function Device)
RSSI	Indicador de fuerza/potencia de señal recibida (Received Signal Strength Indicator)
WPAN	Red de área personal inalámbrica (Wireless Personal Area Network)
ZigBee	Estándar específico para redes de sensores inalámbricas de bajo consumo.
ZigBee Stack	Pila de protocolos que agrupa todos los niveles y especificaciones que añade el estándar ZigBee.

CAPITULO I

PRESENTACIÓN DEL PROYECTO

1.1 INTRODUCCIÓN

Debido a la creciente escasez de agua a nivel mundial, centros de investigación trabajan en el desarrollo de nuevos métodos para la conservación de este recurso. La reutilización de agua residual doméstica tratada es una opción importante para ser explorada con el objetivo de proteger la salud pública y el medio ambiente. Por esta razón es esencial el riguroso control y monitorización oportuna de la calidad higiénica del agua regenerada.

La evaluación de la calidad de agua consiste en un proceso de análisis, interpretación, comunicación y monitorización de las propiedades físicas, químicas y biológicas de la misma, dentro del contexto de uso, actividad humana y la conservación de los recursos naturales.

Un hecho comúnmente aceptado por los profesionales que estudian este problema, es que muchos sistemas relacionados con esta aplicación, no logran obtener información de lugares remotos, obtienen frecuencias de muestreo inapropiadas de valor poco confiable o bien sufren pérdidas de información causadas por las condiciones poco favorables para la transmisión de datos; con estas limitantes es posible que la información no pueda ser evaluada correctamente.

Las redes inalámbricas de sensores han sido ampliamente consideradas como una de las tecnologías más importantes del siglo XXI [1], ya que pueden ser utilizadas para realizar tareas específicas en largos períodos de tiempo y aplicarlas

en diversos entornos como en monitorización de plantas industriales o ambiente, aplicaciones militares, domótica, entre otros.

Zigbee es un estándar de comunicaciones inalámbricas diseñado por la Alianza Zigbee [2] la cual es una comunidad internacional de compañías, quienes promueven esta tecnología con capacidades de control y monitorización basados en características de flexibilidad, consumo energético y bajo costo, funcionando vía radio y de modo bidireccional, cumpliendo el estándar público global que permite a cualquier fabricante crear productos compatibles entre sí.

Además, gracias al apoyo del Departamento de Telecomunicaciones y Microelectrónica del Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey (*ITESM*) [3], quien proporcionó el Kit de desarrollo *XbeeZNet 2.5* de Digi y por otro lado, el Centro del Agua para América Latina y el Caribe (*CAALC*) [4], un centro de investigación del Tecnológico enfocado a temas del uso sustentable del agua, nos provee en la instrucción acerca de los parámetros determinantes de la calidad de agua, así también con los sensores especializados con los que cuenta su laboratorio.

Finalmente se desarrolla un sistema de monitorización de la calidad de agua en la planta de tratamiento de agua residual del *ITESM*, utilizando la tecnología Zigbee que permita determinar los parámetros de nivel de pH, Oxígeno Disuelto OD y temperatura, colocados en tres diferentes tanques de tratamiento.

1.2 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

Plantas de tratamiento de aguas residuales se esfuerzan por desarrollar eficientemente el control y monitorización de las variables que podrían afectar la calidad del agua tratada. Sin embargo, la falta de disponibilidad de datos en tiempo real mediante sistemas flexibles y de bajo costo, que tengan la capacidad de permitir al usuario el acceso dinámico a la información recolectada, complica la toma de decisiones ante un evento que requiera rápida respuesta.

La importancia de utilizar la especificación Zigbee para esta aplicación radica en que ésta utiliza dispositivos que permiten el ahorro de consumo energético, flexibilidad de montaje, bajo costo, práctico escalamiento y control externo. Dejando en manos del diseñador la opción de agregar diferentes tipos de sensores, según las necesidades del usuario debido a su infraestructura e interoperabilidad con otros dispositivos.

El desarrollo de este proyecto permitió la implementación de un prototipo de red inalámbrica sensorial para la monitorización de parámetros esenciales que permitan el control de la calidad de agua para la Planta de Tratamiento de Agua Residual del *ITESM*. La información técnica desarrollada servirá como base para futuras integraciones de redes Zigbee con mayor jerarquía.

Producto de la investigación y estudios realizados previo a la implementación del prototipo se obtuvo un artículo técnico basado en experimentación real llamado “Consideraciones Esenciales de Diseño de Redes Zigbee” [3], el cual fue publicado en el volumen 7 de la revista científica correspondiente al Congreso de Ciencia y Tecnología de la ESPE 2012. Los resultados de este artículo sirvieron como base experimental para el diseño e implementación de las diferentes etapas del proyecto.

1.3 ORGANIZACIÓN DEL PROYECTO

En el **CAPITULO 2** se muestra brevemente la definición, estructura, características, ventajas y aplicaciones de la especificación Zigbee, como también las capas y protocolos del estándar para redes inalámbricas de área personal de baja tasa de datos IEEE 802.15.4 [6], en la cual se basa esta especificación.

En el **CAPITULO 3** se detalla los requerimientos y diseño del sistema de monitorización considerando frecuencia de muestreo, topología, gestión y seguridad de la red.

El **CAPITULO 4** está dedicado a la descripción de las etapas que conlleva la elaboración de este proyecto, así como sus características y funciones dentro del mismo, capacidades y limitaciones.

Individualizando las siguientes etapas: Configuración de los dispositivos de red, programación para la gestión de red en Python [7], programación de la interfaz de usuario e implementación de los circuitos de acondicionamiento.

El **CAPITULO 5** describe los análisis de resultados del sistema en base a pruebas de precisión, comunicación, alcance, consumo y viabilidad del sistema.

En el **CAPITULO 6** se puntualizan las conclusiones y recomendaciones.

Finalmente en ANEXOS se incluye el artículo “Consideraciones Esenciales para el Diseño de Redes Zigbee”, obtenido como resultado del trabajo basado en experimentos e investigaciones realizadas durante la estancia de investigación en el *ITESM*, también se agrega un práctico manual de la utilización del kit de desarrollo *Znet 2.5*, una síntesis de la utilización de PythonTM para el control de éstos dispositivos, algunos ejemplos y códigos de programación.

CAPITULO II

ESPECIFICACIÓN ZIGBEE Y ESTÁNDAR IEEE 802.15.4

2.1 CRONOLOGÍA

El origen de su nombre parte de la idea de una colmena de abejas proliferando alrededor de su panal y comunicándose entre ellas [2]. En 1998 surge la necesidad del diseño de redes inalámbricas específicamente para aplicaciones de automatización de hogares que sean de bajo costo en grandes volúmenes debido a que Wi-Fi® y Bluetooth® no eran consideradas soluciones tan viables para este tipo de tareas. [4].

Rápidamente en el 2000 la IEEE inicia su propio proyecto, IEEE 802.15.4 para *Wireless Personal Area Networks (WPAN)*, el mismo que fue aprobado en 2003 como un estándar en el cual se basaría la primera versión de Zigbee, ratificada en diciembre del 2004.

En el 2006 los dispositivos Zigbee se convierten en los más económicos de mercado llegando a costar un dólar como precio de mayoreo, lo cual los lleva a que el mismo año sea aprobada la especificación actual y en el 2007 se incorporan perfiles de aplicación quedando la última versión r17 [2].

2.2 DEFINICIÓN

Zigbee es un conjunto estandarizado de soluciones que pueden ser implementadas por cualquier fabricante, basado en el estándar IEEE 802.15.4 de redes *WPAN* teniendo como objetivo las aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de datos y maximización de la vida útil de las baterías.

WPAN es creado para proporcionar los medios para la eficiencia energética en la comunicación inalámbrica dentro del *Personal Operative Space (POS)*, conocida como

el área que rodea a un dispositivo inalámbrico no más de 10 metros, sin la necesidad de alguna infraestructura.

2.3 TIPOS DE DISPOSITIVOS

En *Wireless Sensor Networks (WSN)*, los *Full Function Devices (FFDs)* son capaces de realizar todas las tareas descritas en el estándar IEEE 802.15.4 y aceptar cualquier función en la red, lo cual no sucede con los *Reduced Function Devices (RFDs)* que son dispositivos que poseen capacidades limitadas. Por ejemplo un *FFD* puede comunicarse con cualquier otro dispositivo en la red pero un *RFD* puede hablar solo con un *FFD* debido a que la potencia y memoria son inferiores a un *FFD*.

En una red Zigbee, un dispositivo puede tomar tres diferentes funciones: coordinador, enrutador y dispositivo final, la Figura 2.1 Tipos de dispositivos de IEEE 802.15.4 y Zigbee muestra la equivalencia con los dispositivos WSN. Figura 2.1 Tipos de dispositivos de IEEE 802.15.4 y Zigbee

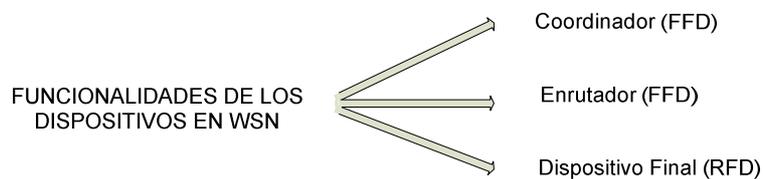


Figura 2.1 Tipos de dispositivos de IEEE 802.15.4 y Zigbee

- **Coordinador**

Es el tipo de dispositivo más completo, debe existir uno por red y sus funcionalidades son las de controlar la red y los caminos que deben seguir los dispositivos para comunicarse entre ellos.

- **Enrutador**

Interconecta los dispositivos separados en la topología de red es decir trabaja como un nodo repetidor.

- **Dispositivo Final**

Posee la funcionalidad necesaria para comunicarse con el nodo padre, el mismo que puede ser un coordinador o enrutador pero no puede comunicarse

con otros dispositivos finales. Es el único dispositivo que puede trabajar en modo de ahorro de energía.

2.4 ARQUITECTURA

Aprobado en el 2003, el estándar IEEE 802.15.4 define el protocolo e interconexión para la comunicación entre dispositivos redes *WPANs* de baja tasa de datos, alcance limitado y bajo consumo de potencia.

Las capas que componen la especificación Zigbee se observan en la Figura 2.2 Capas de Red que conforma la especificación Zigbee. Las dos capas inferiores: la capa física o *Physical Layer (PHY)* y la capa de control de acceso al medio o *Media Access Control (MAC)* son definidas por el estándar IEEE 802.15.4. Posteriormente Zigbee define las capas de red (*NWK*), aplicación (*APL*) y seguridad (*APS Security*), adoptando las dos primeras por estándar IEEE 802.15.4, el cual permite que cualquier dispositivo Zigbee sea compatible con IEEE 802.15.4.

Sin embargo, IEEE 802.15.4 fue desarrollado por independiente de la especificación Zigbee y es posible construir redes inalámbricas de corto alcance basadas únicamente en IEEE 802.15.4 sin implementar capas específicas de Zigbee. En este caso, los usuarios desarrollan sus propias capas *NWK* y *APL* en IEEE 802.15.4, este desarrollo de las capas es tan simple como las capas específicas de Zigbee.

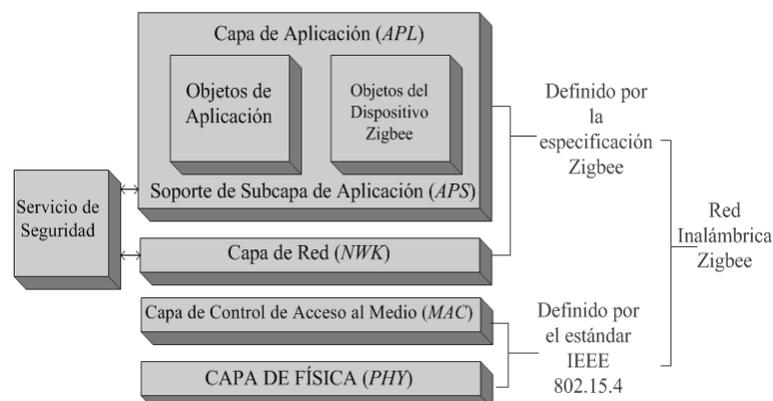


Figura 2.2 Capas de Red que conforma la especificación Zigbee

La decisión de si poner en práctica todo el protocolo Zigbee o simplemente las capas *PHY* y *MAC* de IEEE 802.15.4 depende de la aplicación y del plan a largo plazo para el producto.

- La *PHY* conjuntamente con la *MAC*, brindan servicios de transmisión de datos por el aire, punto a punto. Los parámetros tales como la frecuencia de operación, tasa de datos, recepción, sensibilidad y tipos de dispositivos son especificados en estas capas.
- La *NWK* tiene como objetivo permitir el correcto uso de la *MAC* y ofrecer una interfaz adecuada para su uso por parte de la *APL*. En esta capa se definen los métodos necesarios para: iniciar la red, unirse a la red, enrutar paquetes dirigidos a otros nodos en la red, proporcionar los medios para garantizar la entrega del paquete al destinatario final, filtrar paquetes recibidos, cifrados y autenticados. Es en esta capa donde se desarrollan las distintas topologías de red (árbol, estrella y malla).
- La siguiente capa es la de soporte a la aplicación que es el responsable de mantener el rol que el nodo juega en la red, filtrar paquetes a nivel aplicación, mantener la relación de grupos y dispositivos con los que la aplicación interactúa y simplifica el envío de datos a los diferentes nodos de red.
- En el nivel conceptual más alto se encuentra la capa de aplicación *APL*, que es la aplicación misma y de la que se encargan los fabricantes. Es en esta capa donde se encuentran los *Zigbee Device Objects (ZDO)* que se encargan de definir el papel del dispositivo en la red; la subcapa *APS* y los objetos de aplicación definidos por cada uno de los fabricantes.

Además de las capas mencionadas se integran otro par de módulos: módulo de seguridad, quien provee los servicios para cifrar y autenticar los paquetes, y el módulo de administración del dispositivo Zigbee, encargado de administrar los recursos de red del dispositivo local, además de proporcionar a la aplicación funciones de administración remota de red.

2.5 PROTOCOLOS

Dentro de la capa de red *NWK* se desarrolla el algoritmo de enrutamiento, el cual usa el enrutamiento de malla, que se basa en el protocolo *Ad Hoc On-Demand Vector Routing (AODV)* especificado en RFC 3561 [6]. La memoria y energía es optimizada para el consumo de las baterías de los dispositivos, debido a que minimiza el número de transmisiones *broadcast* para la creación de rutas. En contraste con otros protocolos de enrutamiento, la calidad de una conexión es determinada por la cantidad de saltos en la trayectoria.

Los protocolos se basan en algoritmos de red para la construcción de redes *Ad-Hoc* de baja velocidad. Redes grandes están pensadas para formar un *cluster* de *clusters*, estructuradas en forma de malla o como un solo *cluster*. Los perfiles actuales de los protocolos soportan redes que utilicen o no facilidades de balizado.

Las redes sin balizas acceden al canal por medio de *CSMA/CA*. Los dispositivos enrutadores suelen estar activos todo el tiempo, por lo que requieren una alimentación estable, lo cual permite redes heterogéneas en las que algunos dispositivos transmiten todo el tiempo mientras otros sólo transmiten ante la presencia de estímulos externos.

Los enrutadores generan balizas periódicamente para confirmar su presencia a otros nodos. Los nodos pueden desactivarse entre las recepciones de balizas reduciendo así el ciclo de trabajo *duty cycle*. Los intervalos de balizas pueden ir de $15,36 \text{ ms} * 2^{14} = 251,65824$ segundos a 250 kbps.

Por lo tanto los protocolos Zigbee minimizan el tiempo de actividad de los dispositivos para evitar el uso continuo de energía. En las redes con balizas los nodos solo necesitan estar despiertos mientras transmiten las balizas además de cuando se les asigna un tiempo para transmitir. Pero si no hay balizas, el consumo es asimétrico repartido en dispositivos permanentemente activos y otros que sólo lo están esporádicamente.

La máxima tasa de transmisión es de 250 kbps, el dispositivo pasa la mayor parte de tiempo en un modo de ahorro de energía o más conocido en el modo *Sleep*. Como

resultado, es capaz de ser operativo durante varios años antes de que su batería necesite ser reemplazada.

2.6 TOPOLOGÍA DE ZIGBEE

Una típica red Zigbee se observa en la **Figura 2.3 Topologías de Red Zigbee**, donde el máximo número de dispositivos es de 2^{16} es decir 65535 dispositivos distribuidos en subredes de 255 nodos. Los dispositivos deben ser previamente configurados definiendo su función dentro de la red. Cada dispositivo final busca una red donde asociarse en base al identificador de red o *PAN ID* configurado y a la potencia de la red detectada. Los enrutadores definen el mejor camino hacia el destino permitiendo ampliar la cobertura de la red y los nodos coordinadores tratan de encontrar el canal más adecuado para transmitir de acuerdo a la medición de potencia que realizan para determinar el canal de transmisión menos congestionado.

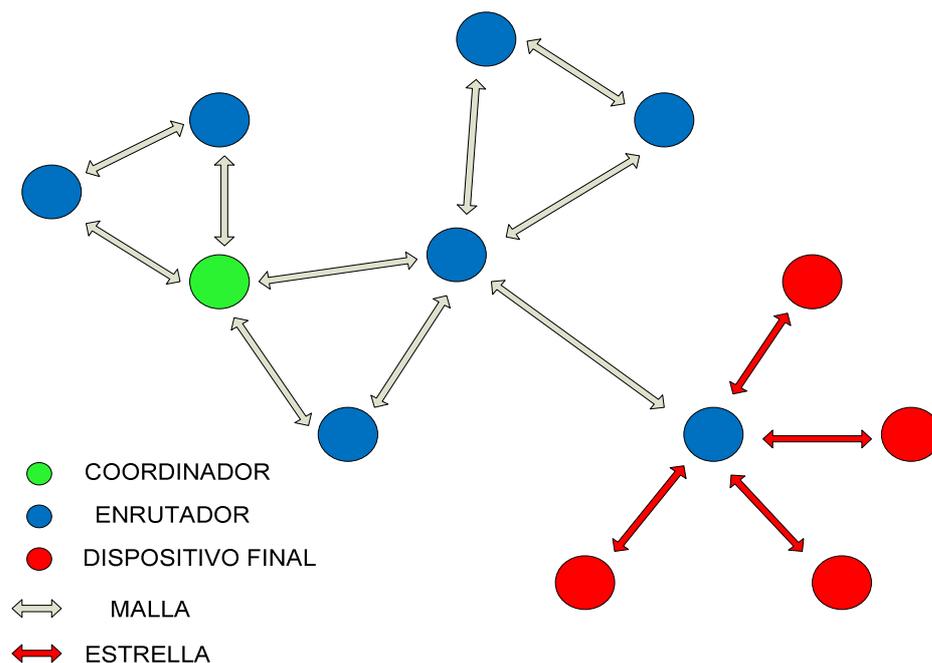


Figura 2.3 Topologías de Red Zigbee

La formación de la red es realizada por la capa de red de Zigbee, la cual define tres topologías:

- **Estrella:** El coordinador es responsable de la inicialización y mantenimiento de los dispositivos de red, todos los dispositivos finales se comunican directamente con el nodo coordinador.
- **Árbol:** Donde el coordinador es responsable de inicializar y configurar algunos parámetros de red, pero la red puede ser extendida usando enrutadores, los mismos que envían datos y mensajes de control usando una estrategia jerárquica.
- **Malla:** De igual manera que en la topología árbol, el coordinador se encarga de inicializar y configurar ciertos parámetros de red, donde al menos uno de los nodos tendrá más de dos conexiones.

La topología más interesante y una de las causas por las que ha triunfado Zigbee es la topología malla o *Mesh*. Ésta permite que si en algún momento un nodo del camino falla y se cae la conexión, pueda seguir la comunicación entre todos los demás nodos debido a que se rehacen todos los caminos, dicha tarea de gestión es realizada por el coordinador.

2.8 BANDAS DE OPERACIÓN

Zigbee opera en las bandas de frecuencia de 2.4 GHz, 868 MHz para Europa y 915 MHz para Estados Unidos; los canales especificados por IEEE 802.15.4 son 16 cada uno de 5 MHz de ancho de banda, de estos canales el 15, 20, 25 y 26 son canales no solapados con los canales de Wi-Fi[®] es decir 802.11b y 802.11g, como se muestra en la Figura 2.4 **Banda de frecuencia IEEE 802.11b/g y Zigbee.**

La especificación Zigbee utiliza un método de codificación de canal de espectro de dispersión por secuencia directa *Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)*, utilizando modulación por desplazamiento de fase binaria *Binary Phase Shift Keying (BPSK)* en los dos rangos menores de frecuencia y modulación por desplazamiento de fase cuaternaria *Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)* ortogonal que transmite dos bits por símbolo en la banda de 2,4 GHz. Éste permite tasas de transmisión de hasta 250 kbps.

El rango de transmisión fue analizado en [3], donde se muestra que para los dispositivos *Znet Series 2*, los cuales transmitiendo a 3 dBm tienen un alcance de 20 metros en interiores y 30 metros en exteriores garantizando un valor de tasa de bit erróneo *Bit Error Rate (BER)* de 10^{-9} .

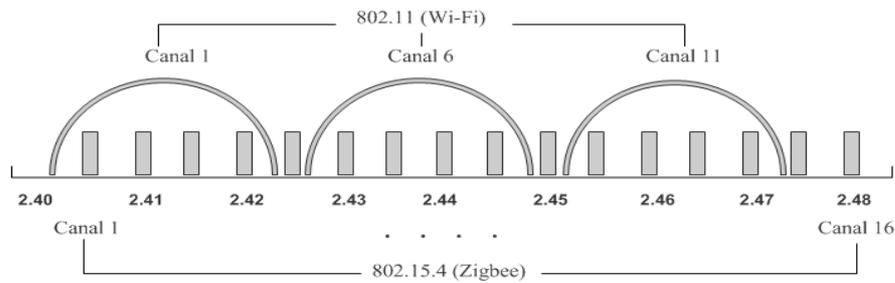


Figura 2.4 Banda de frecuencia IEEE 802.11b/g y Zigbee

2.8.1 Interferencia con Wi-Fi®

Zigbee se esfuerza por ser un medio confiable debido a que asume que el 50% del ancho de banda será perdido por las interferencias que pudieran suceder, pero esto no se aplica en todas las situaciones por lo cual se debe realizar un análisis de las interferencias en el sitio donde se implementará la aplicación.

Wi-Fi® en 802.11 b/g ha definido utilizar los canales 1, 6 y 11 de 22 MHz cada uno, evitando trabajar en canales traslapados, como se observa en la Figura 2.4, donde se muestra que la banda de frecuencias de Zigbee es la misma de Wi-Fi®.

La interferencia que provocan las transmisiones con Wi-Fi® es predominante en muchas áreas donde trabaja Zigbee. Sin embargo Zigbee usa el método de acceso múltiple por detección de portadora con prevención de colisiones *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA-CA)*, lo cual lo habilita para continuar con su comunicación aunque el tráfico Wi-Fi® sea particularmente pesado.

Wifi transmite en menos que el 100% de su ciclo de trabajo

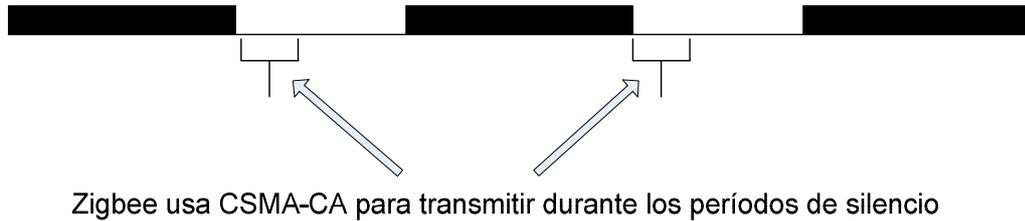


Figura 2.5 Uso de los períodos de silencio de Wi-Fi®

Como se observa en la Figura 2.5, existen espacios de silencio cuando Wi-Fi® está transmitiendo, los mismos que son aprovechados por Zigbee para transmitir y así evitar colisiones. Basados en el estándar IEEE802.15.4 y en pruebas experimentales realizadas en el artículo “Consideraciones esenciales para el diseño de redes Zigbee, se argumenta que existe el 0% de error aún cuando se tenga un enrutador de Wi-Fi® muy cercano a una red Zigbee y trabajando en el mismo canal, demostrando de esta manera el excelente trabajo y robustez que tiene Zigbee al compartir el medio con otras tecnologías.

2.9 MODO AHORRO DE ENERGÍA

Como ya se había expuesto anteriormente, un dispositivo configurado como *RFD* tiene la capacidad de entrar a un modo de ahorro de energía cuando éste no se encuentre en uso. A este modo se lo llama *Sleep Mode*.

Un coordinador solo puede enviar datos hasta que el *RFD* se los solicite mediante una trama *Data Request*, entonces para que exista comunicación continua un *RFD* debe interrogar periódicamente a su padre mientras permanece despierto. El coordinador le contesta con una trama *ACK*, con la cual le indica si tiene o no datos pendientes de entrega. De no tener datos pendientes el dispositivo apaga su receptor y permanece en estado *idle* hasta el siguiente momento de interrogar a su padre o volver a modo *Sleep*.

La forma de operar en bajo consumo puede configurarse mediante el parámetro *SM* en uno de los siguientes modos:

- **Cyclic Sleep** El módulo duerme periódicamente a intervalos regulares. Para entrar a este modo se debe configurar el comando *Sleep Mode (AT SM)*. Si $SM=4$, el módulo entra al modo *Sleep* cuando transcurre un período dado por el comando *Time Before Sleep (AT ST)*, donde ST posee un rango hexadecimal entre 0 y 0xFFFF (x 1ms), el módem despertará cada cierto tiempo, dado por el comando *Sleep Period (AT SP)*, cuyo rango es entre 0 y 0x68B0 (x10 ms). Cuando despierte busca los datos entrantes desde un módulo configurado como coordinador y en caso de no existir, el dispositivo volverá al modo *Sleep*.
- **Pin Sleep** El módulo duerme hasta que es despertado de acuerdo al estado del pin *Sleep_Rq* (pin9). El parámetro $SM=1$ habilita esta opción, cuando el pin se encuentra en estado *low*, el módulo despertará, buscará por datos entrantes, y en caso de no haber reinicia a cero el contador del comando ST , por lo que sólo volverá a dormir cuando transcurra el período dado por éste. Mientras transcurra ese período, cualquier actividad en el pin *Sleep_Rq* será ignorada, hasta que vuelva al modo *Sleep*. Si $SM=1$, el módulo entrará al estado de *Sleep*, si el pin *Sleep_Rq* está en *high*, el módulo cortará cualquier actividad entrante, ya sea de transmisión, recepción o de asociación y entrará al modo *Sleep*, y no saldrá de ahí hasta que el pin *Sleep_Rq* vuelva a estar en *low*. Mientras se encuentre en modo *Sleep*, no responderá a ninguna actividad serial ni a ningún paquete RF entrante, simplemente los desechará.

2.9 MATERIALES UTILIZADOS

El desarrollo de este proyecto se basa en la utilización del *KIT ZNET 2.5 de Digi©*, dotado de un nodo coordinador llamado *ConectPort X4*, 3 *Xbee Series2*, 1 *Xbee-PRO*, 4 placas puertos seriales y alimentación por baterías.

- **Xbee Series2**

Se ha probado el módulo *XbeeSeries2*, observado en la Figura 2.6 antes de la integración del sistema validando las siguientes características:

- Alcance de hasta 30 m en exteriores transmitiendo a 1.25mW (~1 dBm).
- Tasa de datos de 250 kbps
- Tasa de datos de la interfaz serial de 1200 – 230400 bps.
- Sensibilidad de -95 dBm.
- Voltaje de alimentación de 2.1 -3.6 V
- Corriente consumida para transmisión de 35mA.
- Opciones de Antena utilizados Whip y Chip.

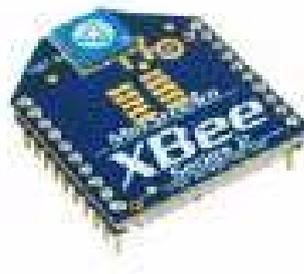


Figura 2.6 Tarjeta XbeeSeries 2

- **Xbee Series2PRO**

De igual manera se ha comprobado las características del módulo *XbeeSeries2PRO*, visualizado en la Figura 2.7.

- A diferencia de los módulos *XBEE*SERIES2, estos trabajan a 100mW (~10 dBm) llegando a un alcance de 100 m.
- Tasa de datos de 250 kbps.
- Tasa de datos de la interfaz Serial de 1200 – 230400 bps



Figura 2.7 Tarjeta XbeeSeries2 PRO

- **ConnectPortX4**

El dispositivo actúa como nodo coordinador *Gateway*, se lo aprecia en la Figura 2.8, está diseñado para proveer conectividad remota para redes en topología malla, con las siguientes características:

- Configuración de algoritmo de seguridad *Advanced Encryption Standard (AES)*
- Conexión USB, puerto serial y Ethernet
- Interfaz para línea de comandos
- Protocolo de mantenimiento de red (SNMP)
- Programación en Python
- DNS Client
- Protocolo de configuración DHCP server



Figura 2.8 ConnectPort X4

- **SENSORES**

Los sensores utilizados para los sitios remotos y que serán conectados a los puertos analógicos mediante un circuito de acondicionamiento de señal son de marca *Applicon*[®] y son proporcionados por el CAALC. Se los puede visualizar en la Figura 2.9.

- **Medidor de Nivel de pH**

El nivel de pH es una función logarítmica de iones de hidrógeno en el medio, donde una unidad de pH representa 10 cambios de concentración de iones de hidrógeno. Se observa en la Figura 2.9 dicho sensor.



Figura 2.1 Sensor de pH

- **Medidor de Oxígeno Disuelto**

El sensor de oxígeno disuelto *Applisens DO* de Applikon[®] está especialmente diseñado para la fermentación y cultivo celular. Construido usando materiales aprobados por la *Food & Drug Administration (FDA)*, 12mm de diámetro, DN25 conector para el lado de la inserción, superficie de electropolitileno, como se muestra en la Figura 2.10.



Figura 2.10 Sensores de OD de Applisens

CAPITULO III

DISEÑO DEL PROTOTIPO

3.1 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA

Los especialistas biotecnólogos del *CAALC* del *ITESM*, requirieron de un prototipo de monitorización de variables que permitan el análisis de la calidad de agua bajo los siguientes conceptos:

- Los datos obtenidos deben cumplir con alto nivel de exactitud, confiabilidad y seguridad.
- Los módulos remotos deben ser portátiles, compactos y preparados para trabajar en espacios donde no se dispone de energía eléctrica.
- El sistema debe por lo menos cumplir con la norma mexicana de aguas residuales *NMX-AA-003-1980* en cuanto a la frecuencia de muestreo y al número de muestras que deben tomarse de acuerdo al tiempo de descarga. Esta norma indica que para un proceso de generador de descarga que opera de 8 a 12 horas por día, como es el caso de la planta de tratamiento del *ITESM*, se deben tomar un mínimo de dos muestras con un intervalo entre toma de muestras de máximo 1 hora. El *CCALC* planteó además la posibilidad aumentar la frecuencia de muestreo del sistema, de tal forma que permita tomar decisiones rápidas ante un evento producido. La selección de la misma se explica posteriormente en este mismo capítulo.
- Mostrar una interfaz de usuario dinámica, con acceso a los datos, históricos y alarmas.
- Considerar la integración de los sensores de marca *Applisens* proporcionados por el *CAALC* al sistema de monitorización, los cuales ya se tenían a disposición para un sistema de medición independiente.
- El sistema cumplirá con los rangos de medición de los sensores, detallados en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Rangos de valores requeridos

Tipo de variable	Rango de funcionalidad de los dispositivos finales	Rango tolerable para detección de alarmas	Tiempo de muestreo
Nivel de PH	0 – 14	6,5 – 7,5	Cada 4 minutos
Nivel de OD	6,50 – 13,4	Depende de la temperatura	Cada 4 minutos
Nivel de temperatura	0 – 100	Solo medido	Cada 4 minutos

3.2 ARQUITECTURA DEL SISTEMA

El sistema de monitorización de la calidad de agua residual consiste en la colocación de los dispositivos finales en tres puntos para la toma de muestras en diferentes tanques dentro del proceso de tratamiento del agua residual. Por lo tanto, se ubicaron dos dispositivos finales en dos tanques de aireación captando valores de oxígeno disuelto y temperatura; y uno en el tanque de desinfección detectando niveles de pH y temperatura. Se muestra la ubicación estos dispositivos en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**



Figura 3.1 Ubicación de los dispositivos finales en las planta de tratamiento

Los dispositivos 1 y 2 ubicados en los tanques de aireación, están fuera del alcance del coordinador, por lo que fue necesario colocar 1 enrutador a 30 metros de éstos, pero para el dispositivo final restante ubicado en el otro tanque de aireación no fue necesario ya que al ser un *Xbee PRO* presenta mayor alcance en relación a los demás.

La **Arquitectura del Sistema** muestra la arquitectura del sistema, donde el coordinador luego de recolectar la información envía los datos recolectados a la base de datos *iDigi Cloud* [10] provista por el fabricante de los módulos *Digi*®, con los cuales estamos trabajando, gracias a que este servicio web es habilitado gratuitamente para un máximo 5 dispositivos coordinadores.

Por otro lado se desarrolló una interfaz de usuario diseñada en LabView™ [11] donde se permite visualizar indicadores y gráficas de los parámetros censados por cada dispositivo final correspondiente a cada punto de muestreo, además un sistema de alarmas y consulta de históricos independientes por cada dispositivo.

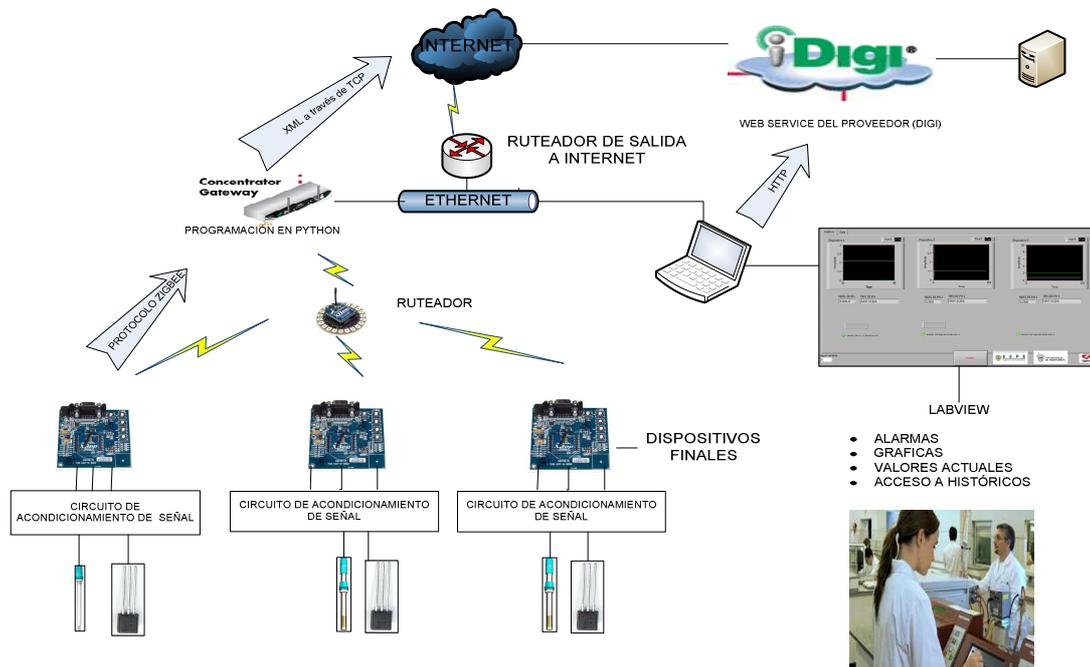


Figura 3.2 Arquitectura del Sistema

3.4 DISEÑO DEL SISTEMA

El diseño del prototipo fue realizado en varias etapas que comprenden: la elección de la topología de red, la frecuencia de muestreo, la gestión de ahorro energético y seguridad de la red.

3.4.1 Diseño de la red Zigbee

a. Topología de Red

La red está estructurada con topología malla que como se especificó en el Capítulo I, es una de las principales características de la tecnología Zigbee, puesto que permite a los paquetes de datos atravesar por múltiples nodos hasta encontrar su nodo destino teniendo en cuenta más de un camino posible. Bajo esta topología se puede extender la red sobre una gran región y apoyar a la comunicación entre todos los dispositivos de red.

Previo al diseño de la topología se realizaron pruebas de alcance y latencia con los dispositivos finales [3], dichas pruebas fueron realizadas con el *Kit Znet de iDigi* los cuales describen un alcance máximo de 30 metros en exteriores con una potencia de transmisión de 3 dBm, que permiten garantizar un enlace confiable para comunicaciones digitales.

Por otro lado, también se realizaron pruebas que permitieron describir el tiempo de latencia y caída del *throughput* que se producen al agregar un nodo enrutador a cada transmisión. Los resultados fueron muy concretos ya que se describe que por cada nodo agregado existe un retardo de 10 ms en una red sin seguridad, además cumple con la relación $1/\sqrt{n}$ en *throughput* por cada nodo añadido.

Estos resultados permitieron la selección de la topología adecuada para el entorno de la aplicación que es la planta de tratamiento de agua residual del *ITESM*. La topología malla consiste en contener dos o más caminos para la conexión entre dos nodos, por esto fue considerada y configurada para este sistema, pues permite a los dispositivos finales comunicarse con el nodo coordinador mediante el enrutador, si no se encuentra dentro del alcance del mismo como es el caso del dispositivo final 1 y 2; o comunicarse directamente con el nodo coordinador como es el caso del dispositivo final 3 el cual está dentro del área de cobertura. A continuación se muestra la topología de la red en la Figura 3.3 **Topología de Red**

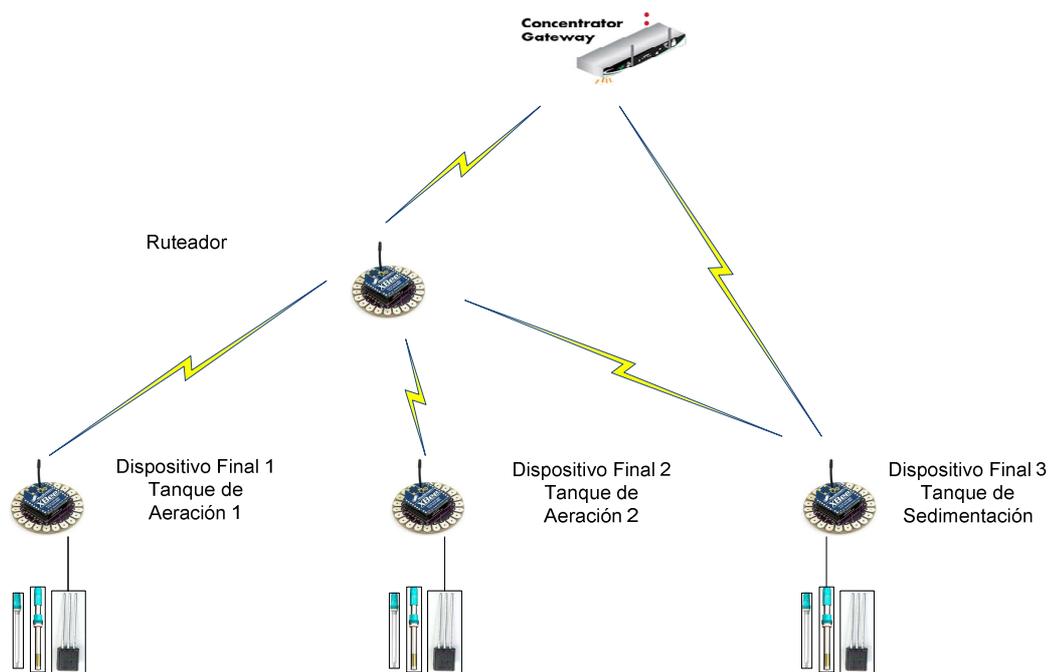


Figura 3.3 Topología de Red

b. Frecuencia de muestreo y gestión de ahorro de energía

El proceso de muestreo de un cuerpo de agua es una actividad muy importante pues determina, junto al análisis adecuado de la muestra, la integridad y confiabilidad de los datos derivados de la misma. La frecuencia de muestreo debe ser programada de tal forma que exista un equilibrio entre el tiempo mínimo requerido para la oportuna toma de decisiones y un eficiente consumo energético.

Actualmente en la planta de tratamiento de aguas residuales se realiza el muestreo cada hora para la medición de PH por indicación del *CCALC*, el análisis es realizado en campo. Por el contrario, para la medición de OD se realizaba el muestreo semanalmente y el análisis de dichas muestras lo ejecutaba una empresa externa al *ITESM*.

Se ha tomado el tiempo que tardan los módulos medidores para entregar un valor estable. En el caso de la medición de pH, el tiempo de estabilización varía de 40 s a 90 s, dependiendo de lo drástico del cambio en este parámetro.

En cambio, para el oxígeno disuelto se distingue un tiempo de reacción más lento variando entre 92 s a 150 s, según la cantidad de oxígeno inyectado al agua y de la temperatura que ésta presenta.

Analizando los requerimientos y opiniones del *CAALC*, y bajo la norma mexicana de aguas residuales y bajo la norma mexicana de aguas residuales NMX-AA-003-1980 [10], se ha determinado que un tiempo de 4 minutos entre cada muestra sería suficiente para evitar la pérdida de información importante producida por un evento desafortunado, como por ejemplo la rotura de la válvula de oxígeno en los tanques de aeración. Durante este tiempo los dispositivos finales permanecerán dormidos o en estado de ahorro de energía.

En [10] también se habla de que el mayor índice de error en el análisis de las muestras es provocada por la mala ejecución del procedimiento de muestreo y el uso de material indebido para captar la muestra. Dado que el sistema de medición propuesto es un sistema directo, en el que el tiempo entre la captura de la muestra y el análisis de la misma es muy corto, esto reduce considerablemente la posibilidad de tener mediciones erradas. A pesar de esto, fue considerado oportuno el tomar 2 muestras por cada ciclo, una al principio y otra al final del período en el que el dispositivo despierta; la principal razón es el material en estado sólido se encuentra circulando por los tanques y que pueden cubrir la membrana de los sensores y dar lugar a una lectura errónea de los datos.

En cuanto a los puntos de muestreo se recomienda tomar las muestras en lugares donde el flujo sea turbulento a fin de asegurar un buen mezclado. Los tanques de aireación, en donde se precisa la medición del parámetro OD, presentan esta característica. El punto de muestreo seleccionado para el pH es el tanque de desinfección que corresponde a la fase final del proceso de tratamiento.

c. Seguridad de la Red

Una consideración muy importante es la seguridad de la red, la cual es tomada muy en cuenta dentro de la tecnología Zigbee, ya que el cifrado de los mensajes antes de la transmisión resuelve el problema de confidencialidad.

Un algoritmo de cifrado modifica un mensaje utilizando una cadena de bits conocida como la clave de seguridad, la cual sólo el destinatario sabrá y así ser capaz de recuperar el mensaje original. El estándar IEEE 802.15.4 soporta el uso de *Advanced Encryption Standard (AES)* para cifrar sus mensajes salientes, el cual es uno de los algoritmos más empleados para cifrado.

3.4.2 Diseño de los circuitos de acondicionamiento de señales

Es fundamental diseñar los circuitos de acoplamiento de señales que permitan la lectura de los parámetros del nivel de pH, OD y temperatura, leídos desde los puertos analógicos de cada dispositivo final para posteriormente procesarlos y enviarlos hacia el usuario final.

Considerando que las entradas analógicas de estos dispositivos soportan de 0 a 1.2 V, todas las señales de salida de los sensores que serán colocados a cada nodo, deberán ser amplificadas dentro de este rango.

a. Circuito de acondicionamiento para el Sensor de pH

Los sensores de pH son instrumentos sumamente sensibles que requieren de extremo cuidado al momento de diseñar un circuito de acoplamiento de señal, debido a que su funcionamiento se basa en el preciso cambio de voltaje que impone un electrodo, llevándolo a ser un instrumento sumamente sensible ante ruido térmico.

La salida del sensor de pH de marca *Applicon*® define 59mV por cada unidad de pH a una temperatura ambiente de 25 °C [11]. El electrodo genera un voltaje de 0 mV con un pH de 7 tomando en cuenta que la sensibilidad del electrodo debería ser mayor al 96.6%.

El electrodo facilita voltajes de salida positivos para niveles menores a pH 7 (alcalino) y valores negativos para valores mayores a 7 (ácido), tal como se observa en la Figura 3.4.

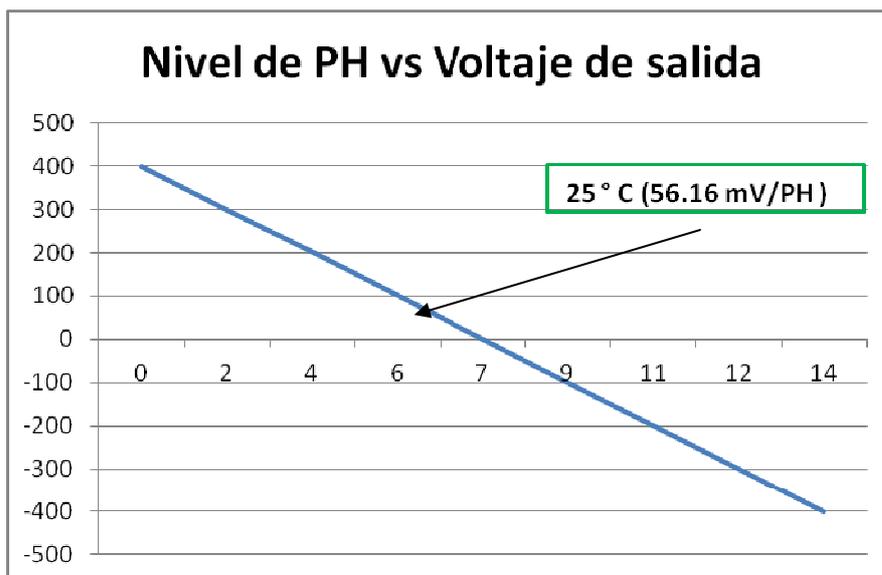


Figura 3.4 Gráfica de Nivel de pH vs Voltaje de salida del Sensor

Debido a que las entradas analógicas de los dispositivos finales soportan un máximo de 1.2 V, se ha realizado un circuito de acoplamiento que permite obtener 1 V como máximo en función del nivel de pH medido.

El nivel de PH según el circuito elaborado describe una relación inversamente proporcional, es decir a mayor nivel de pH menor es el nivel de voltaje a la salida de este circuito.

Fue muy importante el diseño de un circuito en alta impedancia, como se observa en la Figura 3.5, debido a que este electrodo es un transductor de pequeña señal, corriente baja y poca tensión de salida, de esta manera se proporciona una diferencia de potencial mayor para tener una mejor relación señal/ruido.

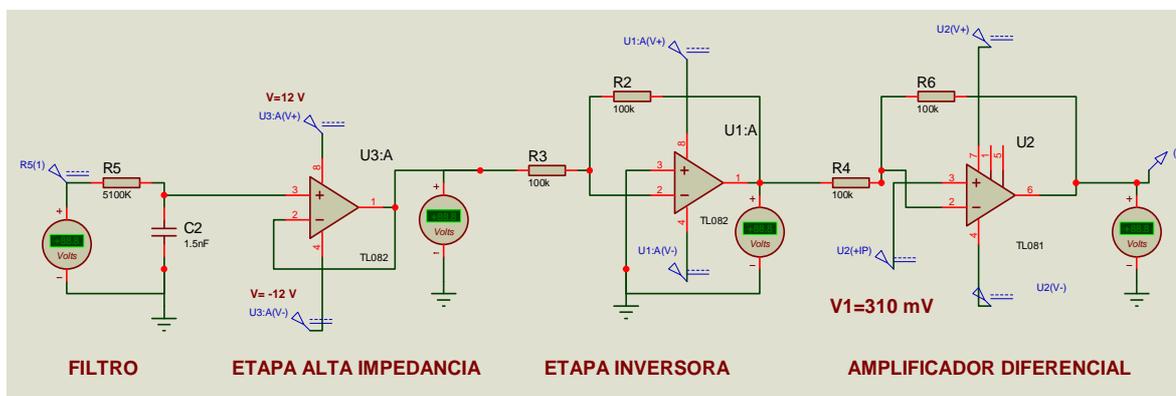


Figura 3.5 Circuito de acoplamiento de Señal del sensor de pH

- **Diseño del Filtro**

El tipo de filtro pasa bajos que se utilizara es un RC que permite atenuar el ruido, que puede provenir de diversas fuentes como ruidos de agentes externos, considerando que la velocidad de respuesta del sensor al cambiar el valor de pH de la solución medida suele ser de hasta 50ms, se decide diseñar un filtro pasa bajos con frecuencia de corte de 20 Hz.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{50ms} = 20 \text{ Hz} \quad (1)$$

La frecuencia de corte también puede ser expresada por la ecuación 2:

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2)$$

Seleccionando un condensador de 1.5nF para C, se obtiene el valor de resistencia R= 5.1MΩ.

De esta forma a la salida del circuito se tiene una señal de voltaje en mV en función del valor de pH medido, filtrada, sin ruido y lista para ser acoplada.

- **Etapa de alta impedancia**

Debido a que la salida del sensor es muy baja y sensible se debe utilizar una etapa de alta impedancia que permita obtener los valores verídicos de la salida del sensor, por lo cual es muy importante colocar una etapa de alta impedancia con el integrado TL082 previo a la etapa inversora con ganancia unitaria.

- **Etapa inversora**

Se denomina inversor debido a que la salida es igual a la señal de entrada pero con signo contrario. Se diseña un amplificador de ganancia unitaria en base a la ecuación 3, de donde se obtiene los valores de R₂ y R₄ igual a 100 kΩ.

$$\frac{-V_o}{R_2} = \frac{V_i}{R_1} \quad (3)$$

- **Diseño del amplificador diferencial**

Se requiere a la salida del circuito un rango de voltaje a la salida de 0 a 1 V, sumando las dos señales que proviene del circuito inversor V_1 y la fuente sumadora V_2 .

Se diseña un amplificador diferencial, donde R_4 y R_6 es igual a 100 k Ω , y bajo el teorema de superposición, primeramente se asume que $V_2 = 0$ para posteriormente calcular el valor de salida con la Ecuación 4.

$$V_{o2}' = \frac{R_4 + R_6}{R_4} * V_1 \quad (4)$$

Luego asumiendo que $V_1=0$:

$$V_{o2}'' = -V_2 * \frac{R_6}{R_4}$$

$$V_{o2} = V_{o2}' + V_{o2}'' = V_1 * \frac{(R_4 + R_6)}{R_4} - V_2 * \frac{R_6}{R_4}$$

$$V_{o2} = 2 * V_1 - V_2$$

Donde para un valor máximo de $V_{o2} = 1$, extraemos el valor de V_1 u offset que colocaremos en la entrada positiva del amplificador diferencial:

$$V_1 = \frac{V_{o2} + V_2}{2} = \frac{1 - 0,38}{2} = 0,31 [V]$$

b. Circuito de Acoplamiento para el Sensor de Oxígeno Disuelto

El sensor de OD es un sensor polarográfico, esto quiere decir que necesita de un voltaje de polarización negativa aplicado a su cátodo para funcionar. Para este caso el sensor requirió de un voltaje de polarización negativa de -0.666V, dato obtenido del fabricante. Con este voltaje de polarización, el sensor entrega un rango de corriente aproximadamente de 0 – 66nA (25 °C) [12], por lo cual los valores de corriente no pudieron ser medidos por un amperímetro común y fue necesario realizar varias fases de acondicionamiento.

El circuito de acoplamiento consta de tres etapas: la etapa de conversión de corriente a voltaje con ganancia, inversión de voltaje negativo a positivo y producción de voltaje de polarización. La Figura 3.6 muestra las etapas mencionadas.

Para protección de las entradas analógicas se conectó a la salida del circuito acoplador a una resistencia y a dos diodos de 0.7V en serie dirigidos a tierra. Con el valor de voltaje que entrará a la compuerta analógica del dispositivo final no superará los 1.4 V.

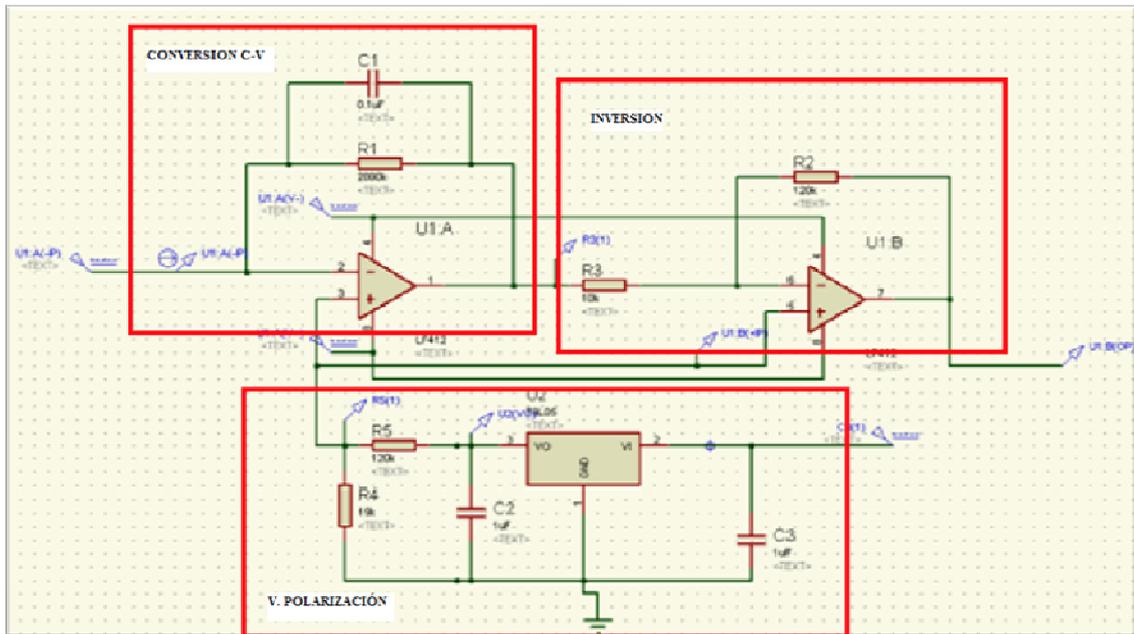


Figura 3.6 Circuito de acoplamiento de señal del sensor de Oxígeno Disuelto.

- **Etapa de conversión de corriente a tensión y de inversión.**

Para esta etapa se utilizó un amplificador operacional con entrada JFET LF412CN, elegido por requerir una muy baja corriente de alimentación y corriente BIAS muy pequeña. La ganancia fue ajustada mediante un potenciómetro de $2M\Omega$, I_o es la corriente entregada por el sensor, V_c es el valor resultante de la conversión de corriente a voltaje, V_{pol} es el voltaje de polarización y V_o es el voltaje de salida del circuito, todas estas variables se aplican en la Ecuación 5.

$$V_c = -(I_o * R1) - V_{pol} \quad (5)$$

$$(I_o * 2M\Omega) - 0.666V = -0.666V \text{ a } -0.798V$$

$$V_o = -V_c = 0.666V \text{ a } 0.798V$$

- **Etapa de producción del voltaje de polarización.**

Para esta etapa se utilizó un regulador de voltaje negativo L7905, para limitar el voltaje de salida de las baterías a -5V. Se realizó un divisor de voltaje para calibrar el valor esperado mediante la ecuación 4.

$$V_{pol} = \frac{1.5k}{10k+1.5k} * -5V = -0.657V \quad (6)$$

c. Circuito de Acoplamiento para el Sensor de Temperatura

No fue necesario realizar un circuito de acoplamiento para el sensor de temperatura, ya que el circuito integrado utilizado (LM35DT) nos entrega el rango de voltaje requerido, es decir de 0 a 1 V [13], donde cada 10mV representan 1°C. Fue importante cubrir el circuito integrado con silicón o cualquier material aislante estará en contacto directo con el agua.

Para protección de las entradas analógicas se conectó a la salida del circuito acoplador a una resistencia y a dos diodos de 0.7V en serie puestos a tierra. Con esto el valor de voltaje que entrará a la compuerta analógica del dispositivo final no superará los 1.4 V.

3.4.3 DISEÑO DE LA INTERFAZ DE USUARIO

Para cumplir el requerimiento de visualización de datos, se diseña una interfaz de usuario práctica, sencilla y que permita la monitorización de los datos en tiempo real. Utilizando Labview™ como desarrollador de software se diseña una interfaz que permite el acceso a los datos, visualización de históricos, detección de alarmas y gráficas describiendo el comportamiento de los parámetros a controlar para determinar la calidad de agua.

Considerando la lectura de los parámetros de nivel de pH, temperatura y oxígeno disuelto desde el servidor de *iDigi cloud* con un retardo de 1 segundo, permite la visualización de dichos parámetros así como también observar gráficas dinámicas del comportamiento de las mismas.

Se permite la visualización de históricos de cada dispositivo remoto detallando: el número de identificación, los valores de los parámetros censados, fecha y hora de la toma de muestra; además es posible la visualización de históricos y alarmas con los mismos parámetros antes descritos.

Las etapas del diseño de la interfaz de usuario de detalla en el CAPITULO 4 de desarrollo del prototipo.

CAPITULO IV

DESARROLLO DEL PROTOTIPO

4.1 CONFIGURACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE RED

La configuración de los dispositivos finales y enrutador se la ha realizado a través del software de Digi© X-CTU [14], para el caso del nodo concentrador se accedió vía Ethernet al dispositivo y la configuración se realizó mediante su interfaz web, como se observa en la Figura 4.1.

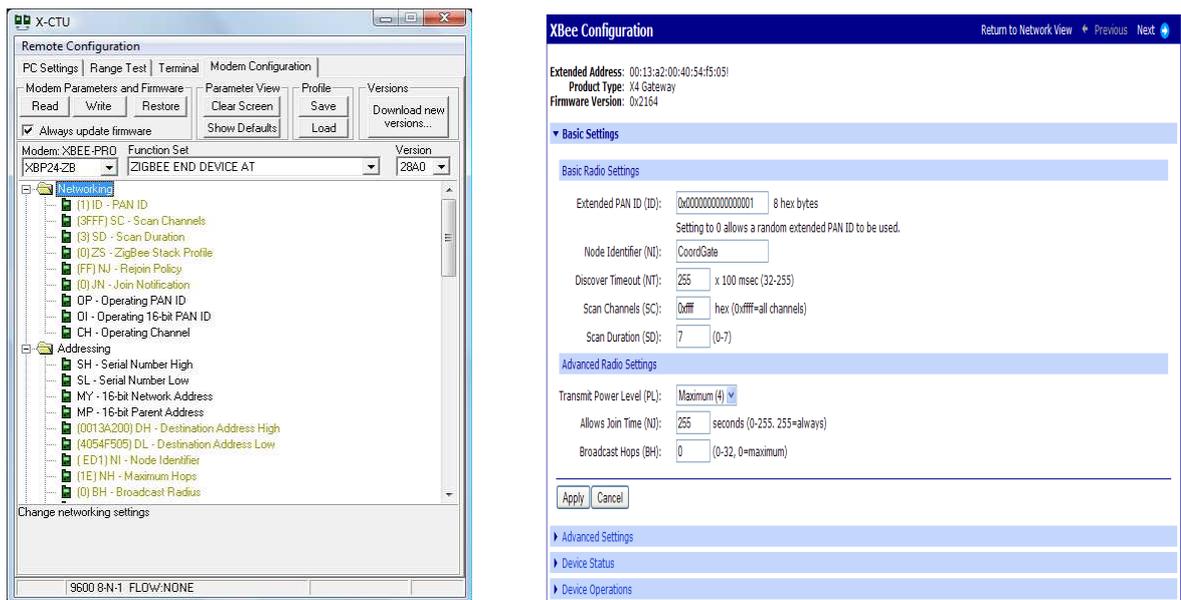


Figura 4.1. Software X-CTU e interfaz Web para configuración de dispositivos.

4.1.1 CONFIGURACIÓN DEL DISPOSITIVO COORDINADOR

El nodo Coordinador es el dispositivo *ConnectPortX4*, se lo configuró para que transmitiera hacia todos los dispositivos de la red (modo *broadcast*), a través del canal F de radiofrecuencia, el cual es un canal libre de interferencia Wi-Fi® y que corresponde a la

frecuencia 2.425 GHz. Es necesario especificar en el coordinador el tiempo en el que van a dormir los dispositivos finales, es decir 4 minutos. El identificador de la red o *PAN ID* es 1. En la Tabla 4.1 se muestran los parámetros de configuración y los valores asignados para este dispositivo.

Tabla 4.1. Parámetros de configuración del nodo Coordinador.

<i>Comando</i>	<i>Descripción</i>	<i>Valor asignado</i>	<i>Función</i>
<i>AT</i>			
ID	PAN ID	1	PAN 1
SC	SCAN CHANNELS	10	Escanea únicamente el canal F.
CH	OPERATING CHANNEL	F	Utiliza el canal F
SH	SERIAL NUMBER HIGH	0013A200	Dirección extendida del Coordinator
SL	SERIAL NUMBER LOW	5054F505	
DH	DESTINATION ADDRESS HIGH	0000	Transmisión broadcast.
DL	DESTINATION ADDRESS LOW	FFFF	
NI	NODE IDENTIFIER	ESTACION CENTRAL	Nombre del dispositivo ESTACION CENTRAL
SP	SLEEP PERIOD	7D0	Duerme 20 segundos
SN	NUMBER OF CYCLIC SLEEP PERIODS	C	12 periodos de <i>sleep</i> .

4.1.2 CONFIGURACIÓN DEL DISPOSITIVO ENRUTADOR

El nodo enrutador es un dispositivo *XBEE SERIES 2PRO*, se lo configura direccionándolo al nodo coordinador, utilizando el mismo canal F y el mismo *PAN ID*. Igual que en el caso del Coordinador, es necesario especificar el tiempo en el que van a dormir los dispositivos finales, es decir 4 minutos. Es importante recordar que el nodo enrutador no tiene la capacidad de dormir. En la Tabla 4.2 se muestran los parámetros de configuración y los valores asignados para este dispositivo.

Tabla 4.2. Parámetros de configuración para el nodo enrutador.

<i>Comando</i>	<i>Descripción</i>	<i>Valor asignado</i>	<i>Función</i>
AT			
ID	PAN ID	1	PAN 1
SC	SCAN CHANNELS	10	Escanea únicamente el canal F
CH	OPERATING CHANNEL	F	Utiliza el canal F
SH	SERIAL NUMBER HIGH	0013A200	Dirección extendida de enrutador.
	SERIAL NUMBER LOW	402C1A42	
DH	DESTINATION ADDRESS HIGH	0013A200	Direccionado al Coordinador
DL	DESTINATION ADDRESS LOW	4054F505	
NI	NODE IDENTIFIER	ROUTER	Nombre del dispositivo ROUTER
SM	SLEEP MODE	0	No duerme
SP	SLEEP PERIOD	7D0	Duerme 20 segundos
SN	NUMBER OF CYCLIC SLEEP PERIODS	C	12 periodos de sleep.

4.1.3 CONFIGURACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS FINALES

Se configuran los dispositivos finales con el mismo identificador de red y canal de operación. Todos los dispositivos finales deben estar direccionados al nodo Coordinador. Se ha configurado los dispositivos en modo cíclico de bajo consumo, lo que significa que éstos dormirán por un tiempo establecido (4 minutos), para después despertar y realizar la consulta de mensajes al nodo coordinador y posteriormente transmitir los datos captados en las entradas analógicas. Todo esto lo debe hacer en 2 segundos, tiempo en el que

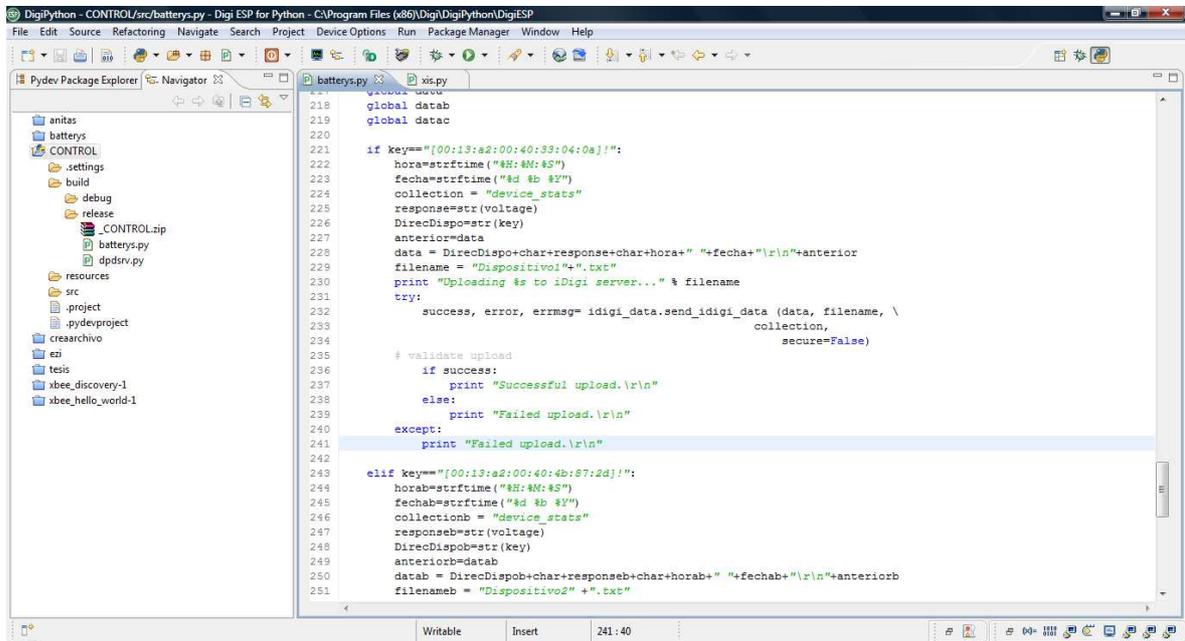
permanece despierto. En la Tabla 4.3 se muestran los parámetros de configuración y los valores asignados para este dispositivo.

Tabla 4.3. Parámetros de configuración de los nodos finales.

<i>Comando</i>	<i>Descripción</i>	<i>Valor asignado</i>	<i>Función</i>
<i>AT</i>			
ID	PAN ID	1	PAN 1
SC	SCAN CHANNELS	10	Escanea únicamente el canal F
CH	OPERATING CHANNEL	F	Utiliza el canal F
SH	SERIAL NUMBER HIGH	0013A200	Direcciones extendidas de los dispositivos finales.
SL	SERIAL NUMBER LOW	404B872D 4033040A 402C1A33	
DH	DESTINATION ADDRESS HIGH	0013A200	
DL	DESTINATION ADDRESS LOW	4054F505	Direccionado al Coordinador
NI	NODE IDENTIFIER	ED 1 /2 /3	Nombre del dispositivo ROUTER
D1	AD1/DIO1 Configuration	ADC	Habilitar Convertidor Análogo-Digital
D2	AD2/DIO2 Configuration	ADC	Habilitar Convertidor Análogo-Digital
D3	AD3/DIO3 Configuration	ADC	Habilitar Convertidor Análogo-Digital
SM	SLEEP MODE	4	Duerme cíclicamente.
SO	SLEEP OPTIONS	4	Habilita el ciclo sleep extendido (duerme SN*SP segundos).
SP	SLEEP PERIOD	7D0	Duerme 20 segundos
SN	NUMBER OF CYCLIC SLEEP PERIODS	C	12 periodos de sleep.
ST	TIME BEFORE SLEEP	7D0	Despierta 2000 milisegundos antes de volver a dormir.
IR	IO Sampling Rate	3E8	Envía dos muestras al durante el tiempo que permanece despierto.

4.2 PROGRAMACIÓN PARA GESTIÓN DE RED (PYTHON)

El software utilizado para la programación del nodo coordinador es *DigiESP™ for Python™* versión 1.3.0 [15], como se observa en la Figura 4.2.



```
218 global datab
219 global datac
220
221 if key=="[00:13:a2:00:40:33:04:0a]!":
222     hora=strftime("%H:%M:%S")
223     fecha=strftime("%d %b %Y")
224     collection = "device_stats"
225     response=str(voltage)
226     DirecDispo=str(key)
227     anterior=data
228     data = DirecDispo+char+response+char+hora+" "+fecha+"\r\n"+anterior
229     filename = "Dispositivo1.txt"
230     print "Uploading %s to iDigi server..." % filename
231     try:
232         success, error, errmsg= idigi_data.send_idigi_data (data, filename, \
233                                                         collection,
234                                                         secure=False)
235
236     # validate upload
237     if success:
238         print "Successful upload.\r\n"
239     else:
240         print "Failed upload.\r\n"
241     except:
242         print "Failed upload.\r\n"
243
244 elif key=="[00:13:a2:00:40:4b:87:2d]!":
245     horab=strftime("%H:%M:%S")
246     fechab=strftime("%d %b %Y")
247     collectionb = "device_stats"
248     responseb=str(voltage)
249     DirecDispo=str(key)
250     datab = DirecDispo+char+responseb+char+horab+" "+fechab+"\r\n"+anteriorb
251     filenameb = "Dispositivo2.txt"
```

Figura 4.1. Captura de pantalla del software *Digi ESP for Python*.

El programa consta de 2 librerías: *xis.py* y *batterys.py*.

- **xis.py** Contiene la clase *IOSample*, el cual consiste en un método de mapeo para extraer la información del estado de los puertos.
- **batterys.py** Contiene el descubrimiento de los dispositivos de la red, la lectura de los puertos, las funciones de transferencia a valores de PH, oxígeno disuelto y temperatura y el envío de los datos a la base de datos de *Digi© iDigi Cloud™*.

En la librería *batterys.py* se definen las siguientes funciones: función *main*, *imprime_datos*, *handle_sample* y *guarda_histórico*, las cuales se describen a continuación:

Función principal o main En esta función se crea un socket de comunicación entre los dispositivos a por medio de la función **socket()**. Se tomó como argumentos el nombre de la familia Zigbee *AF_ZIGBEE*, tipo de transporte por datagramas

SOCK_DGRAM y protocolo de transporte propietario *ZBS_PROT_TRANSPORT*. Se procede a la identificación de los dispositivos activos de la red mediante la función *getmodelist()* y el filtrado de los dispositivos finales.

Función *handle_sample*.- Este método es llamado cuando una muestra es recibida desde la red. En esta función se llama a la clase *IOSample* definida en la librería *xis.py*. Se utiliza la función *get_analog_pin()* para extraer el valor del estado de las compuertas. Este método también contiene las ecuaciones o funciones de transferencia utilizadas para convertir los valores de voltaje a valores que representen el nivel de PH, Oxígeno Disuelto y Temperatura.

La Tabla 4.4 especifica las funciones de escalamiento utilizadas por el sistema para cada parámetro medido.

Tabla 4.4 Funciones de escalamiento para temperatura, pH y oxígeno disuelto.

PARAMETRO	ECUACION v:respuesta en voltaje
Temperatura (°C)	$temperatura=v*100$
pH (unidad de pH)	$ph=-18.38*v+20.73$
Oxígeno Disuelto (mg/l)	<p><i>Corrección de Temperatura</i></p> $correc_T=v+0.003*(-(tem-25))$ $lineal=(Correc_T - 0.670)/(0.127)$ <p><i>Para 0° < temperatura <= 20°</i></p> $OD_Saturado=14.6*math.exp((-0.02487)*(tem-0))$ $Oxigeno_Disuelto=lineal* OD_Saturado$ <p><i>Para 20° < temperatura <= 40°</i></p> $OD_Saturado=8.90*math.exp((-0.01783)*(tem-21))$ $Oxigeno_Disuelto =lineal* OD_Saturado$ <p><i>Porcentaje de Saturación</i></p> $saturacion=(Oxigeno_Disuelto *100)/ OD_Saturado$

Función *imprime_datos*.- En esta función se realiza un ciclo para que por cada nodo final descubierto se extraiga su valor correspondiente a los parámetros medidos y se envíe a la base de datos de manera continua a través de la función *guarda_historico()*.

Función guarda_historico.- Aquí se realiza la clasificación de la información correspondiente a cada dispositivo para que posteriormente sea cargada en un archivo del servidor *iDigi Cloud* a forma de histórico mediante el método *idigi_data.send_idigi_data*. Se define un nombre de archivo para cada dispositivo final.

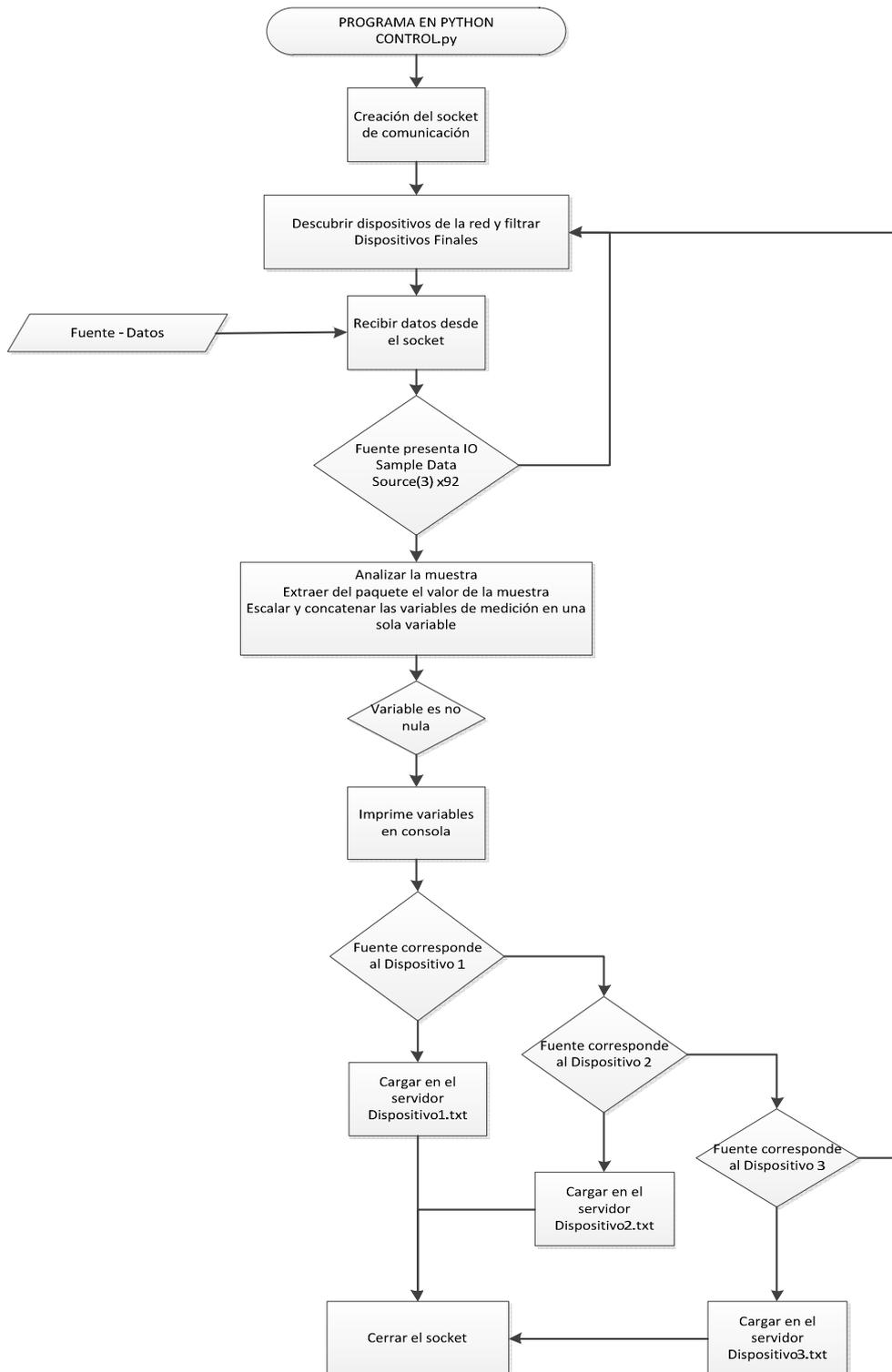


Figura 4.3. Diagrama de flujo del código de programación batterys.py en Python.

La Figura 4.3 muestra el diagrama de flujo correspondiente al código del programa, el código completo se encuentra detallado en ANEXO 1.

4.3 PROGRAMACIÓN DE LA INTERFAZ DE USUARIO (LABVIEW™)

La Figura 4.4 muestra un diagrama de los bloques que componen el la interfaz de usuario programada en Labview™ [16].

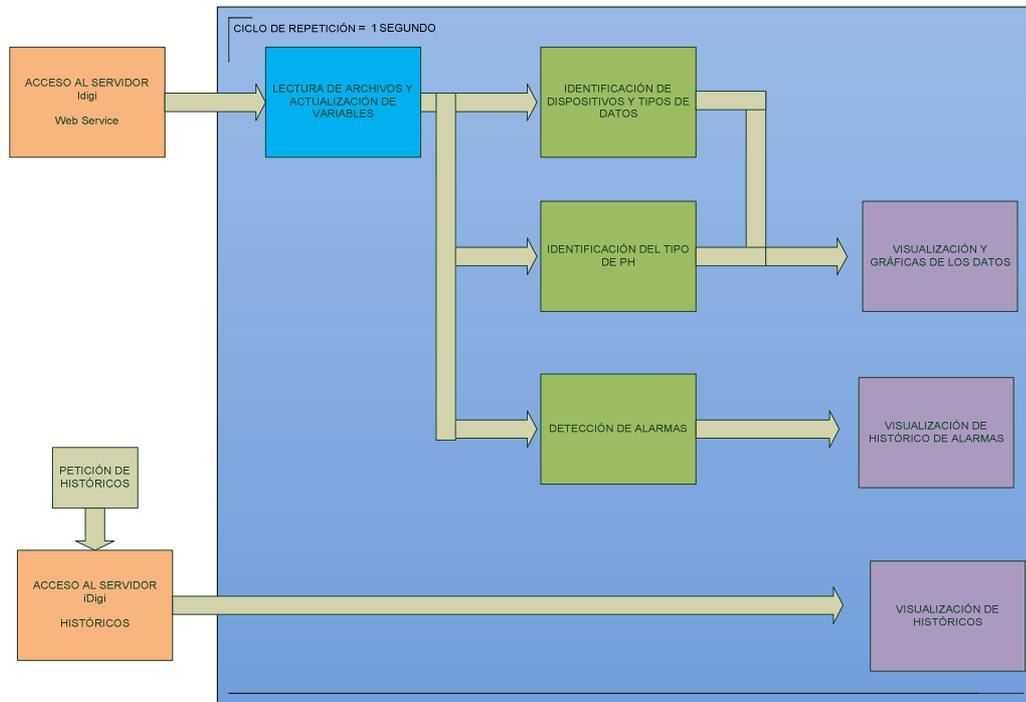


Figura 0.4. Diagrama de Bloques de la Interfaz de usuario.

La interfaz de usuario, permite la presentación de los datos medidos en los tanques especificados dentro de la planta de tratamiento de agua residual. Dicha interfaz fue instalada dentro de la planta y otra interfaz en los laboratorios del *ITESM* ya que el acceso a los datos puede ser vía remota.

La interfaz está conformada por cuatro pestañas que permiten al usuario acceso a los datos recolectados de manera fácil y dinámica debido a que actualiza y descarga datos e históricos desde la base de datos de *iDigi*, la cual nos permite interactuar de forma gratuita al utilizar menos de 5 dispositivos conectados.

Se requiere un servicio web para acceder a los datos que fueron cargados por *DigiESP™* al servidor y los cuales debemos leerlos configurando una cuenta de usuario y para de esta manera acceder a todos los servicios gratuitos de *iDigi™*, Figura 4.5.

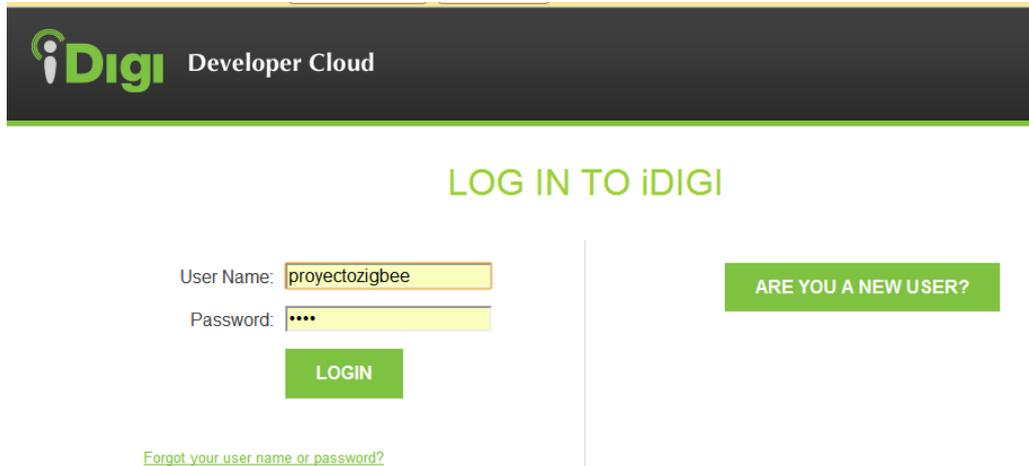


Figura 4.5 Autenticación al servidor de iDigi

Posteriormente se guardan estos archivos para poder analizarlos, creando un archivo de texto que será actualizado cada segundo y que permite organizar los datos para luego ser graficados, comparados para el sistema de alarmas y mostrarlos al usuario.

Por otro lado se presenta la opción de observar históricos de hasta un mes anterior a la fecha de consulta, el mismo que funciona digitando el dispositivo que se requiere consultar y presionando un botón para desglosar la información guardada en el servidor.

4.3.1 DESCRIPCIÓN DE PANTALLAS

La primera pestaña de la Figura 4.6, muestra una rápida presentación de proyecto, así como también de los autores e instituciones que financian este proyecto.



Figura 4.6 Primera pantalla de interfaz de usuario en Labview™

En la segunda pestaña mostrada en la Figura 4.7, despliegan los campos de nivel de pH, temperatura, concentración y porcentaje de oxígeno disuelto, además de gráficas que permiten observar al usuario el comportamiento de estos parámetros.

Los parámetros que nos permiten determinar la calidad del agua son actualizados cada 4 minutos. Ha sido considerado que este retardo no afectará a la toma de decisiones de los biotecnólogos debido a que actualmente la frecuencia de muestreo con la que realizan las mediciones es menor y el propósito del sistema es mejorar la continuidad del proceso de monitorización.

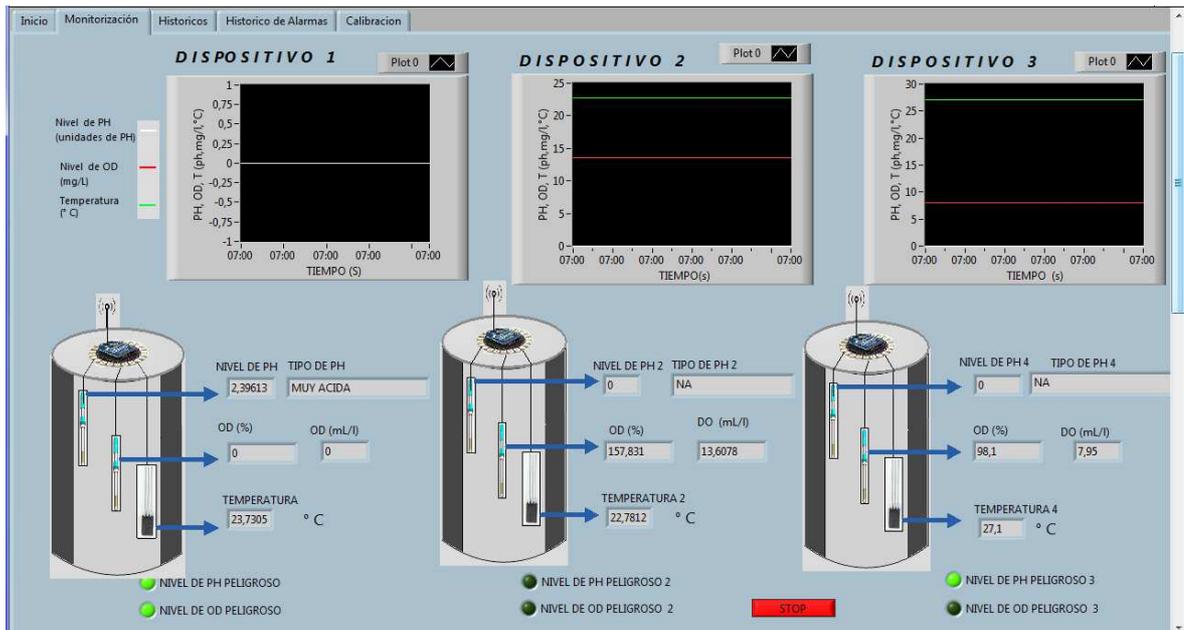


Figura 4.7. Segunda pantalla de la interfaz de usuario en Labview™

La Figura 4.8 muestra la tercera pantalla, donde luego de ingresar el número de dispositivo a consultar se desglosa el histórico de hasta un mes antes de la fecha de acceso ya que estos valores han sido guardados en la base de datos con la que estamos trabajando.



Figura 4.8 Tercera Pantalla de la Interfaz de usuario en Labview™

El histórico de alarmas se muestra en la Figura 4.9, que permite observar todas las alarmas que han ocurrido durante las últimas 100 veces que alguno de los parámetros se comportó fuera de los especificado. Dicho histórico muestra la dirección del dispositivo desde el cual se detectó la alarma, los valores fuera de rango con su respectiva hora y fecha.

DATOS HISTÓRICOS						
ALARMAS	ID DEL DISPOSITIVO	NIVEL DE PH (unidades de PH)	CONCENTRACIÓN DE OD (mg/L)	PORCENTAJE DE OD (%)	TEMPERATURA (° C)	FECHA Y HORA
	[00:13:a2:00:40:2c:1A:33]	NA	7,95	98,1	27,1	11:31:06 30 May 2012
	[00:13:a2:00:40:2c:1A:33]	NA	7,95	98,1	27,1	11:31:06 30 May 2012
	[00:13:a2:00:40:4b:87:2d]	NA	13,6078380878	157,830954724	22,78125	08:58:44 01 Jun 2012
	[00:13:a2:00:40:4b:87:2d]	NA	13,6078380878	157,830954724	22,78125	08:58:44 01 Jun 2012
	[00:13:a2:00:40:33:04:0a]	2,39612617188	NA	NA	23,73046875	07:41:58 01 Jun 2012
	[00:13:a2:00:40:2c:1A:33]	NA	7,95	98,1	27,1	11:31:06 30 May 2012
	[00:13:a2:00:40:4b:87:2d]	NA	13,6078380878	157,830954724	22,78125	08:58:44 01 Jun 2012
	[00:13:a2:00:40:33:04:0a]	2,39612617188	NA	NA	23,73046875	07:41:58 01 Jun 2012
	[00:13:a2:00:40:2c:1A:33]	NA	7,95	98,1	27,1	11:31:06 30 May 2012
	[00:13:a2:00:40:4b:87:2d]	NA	13,6078380878	157,830954724	22,78125	08:58:44 01 Jun 2012
	[00:13:a2:00:40:33:04:0a]	2,39612617188	NA	NA	23,73046875	07:41:58 01 Jun 2012
	[00:13:a2:00:40:2c:1A:33]	NA	7,95	98,1	27,1	11:31:06 30 May 2012
	[00:13:a2:00:40:4b:87:2d]	NA	13,6078380878	157,830954724	22,78125	08:58:44 01 Jun 2012
	[00:13:a2:00:40:33:04:0a]	2,39612617188	NA	NA	23,73046875	07:41:58 01 Jun 2012
	[00:13:a2:00:40:2c:1A:33]	NA	7,95	98,1	27,1	11:31:06 30 May 2012
	[00:13:a2:00:40:4b:87:2d]	NA	13,6078380878	157,830954724	22,78125	08:58:44 01 Jun 2012
	[00:13:a2:00:40:33:04:0a]	2,39612617188	NA	NA	23,73046875	07:41:58 01 Jun 2012

Figura 4.9 Pantalla de histórico de alarmas en la interfaz de Labview™

4.4 INTEGRACIÓN DEL SISTEMA

4.4.1 Dispositivo Final 1

La integración del dispositivo final 1 seleccionado para la monitorización de pH y temperatura en el tanque de sedimentación, el cual como se planteó en los requerimientos del sistema cumple con características de: fácil instalación, compacto y uso de alimentación por baterías. La implementación de este módulo se detalla en el diagrama de bloques de la Figura 4.10, el cual describe la salida del sensor conectada al circuito de acondicionamiento no sin antes pasar por la placa de aluminio que impida el contacto directo con el sensor y controle el nivel de interferencia para el electrodo; el circuito de acondicionamiento es alimentado por dos baterías de 9 V debido a que los amplificadores operacionales que se encuentran operando dentro de este circuito requieren de alimentación positiva y negativa para realizar su trabajo.

Posteriormente la salida de la etapa de acondicionamiento de la señal es conectada a uno de los puertos analógicos del módulo Xbee, juntamente con la salida del sensor de

temperatura el cual no requirió de una etapa de acondicionamiento de señal como se lo especifico anteriormente.

El módulo Xbee es alimentado con otra batería de 9 V que le permite estar listo para enviar inalámbricamente los valores de voltaje recolectados en sus entradas analógicas hacia el nodo Coordinador mediante una antena dipolo, la cual ya estaba integrada de fábrica con el módulo Xbee.

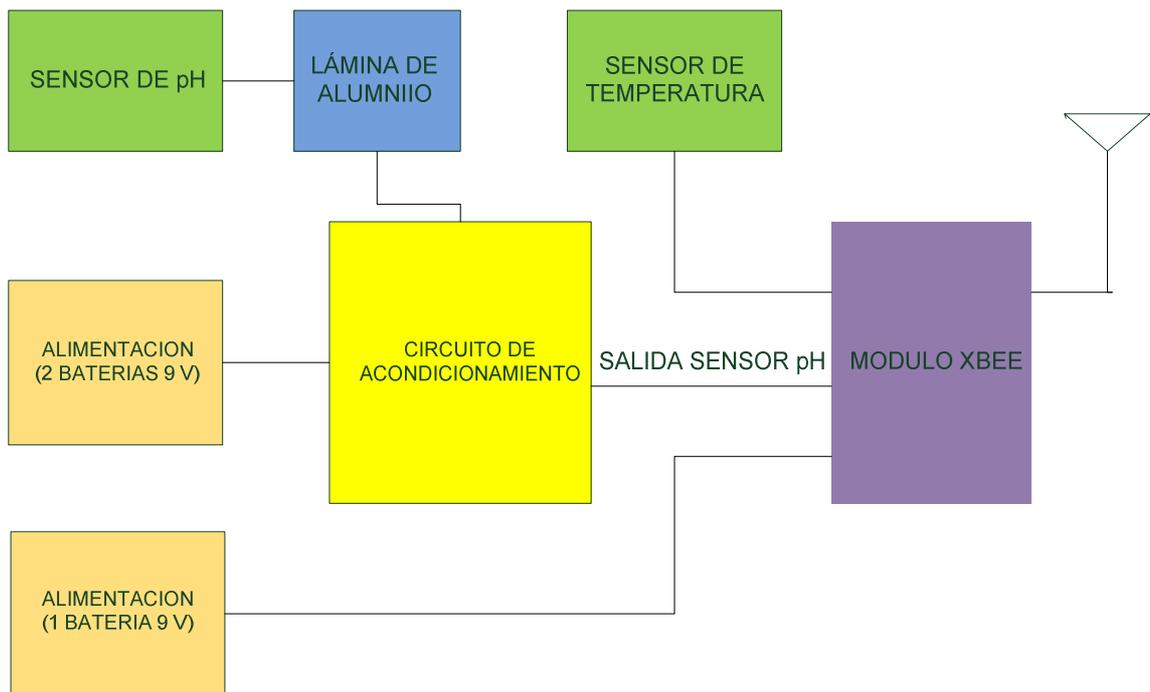


Figura 0.10 Diagrama de bloques del dispositivo final 1

4.4.2 Dispositivos Finales 2 y 3

La integración de los dispositivos finales 2 y 3, ubicados en los tanques de aireación, han sido seleccionados para la monitorización de oxígeno disuelto y temperatura. Con iguales requerimientos que el dispositivo final 1, se describe el diagrama de bloques de la Figura 4.11, donde la salida del sensor de oxígeno disuelto pasa a través de una lámina de aluminio que permite el aislamiento del circuito e impide la interferencia con el electrodo.

El circuito de acoplamiento de igual forma que el dispositivo final 1, se alimenta con dos baterías de 9 V y su salida es conectada a los puertos analógicos del módulo Xbee, en

el cual también se conecta el sensor de temperatura que como habíamos detallado no requiere de un circuito de acondicionamiento.

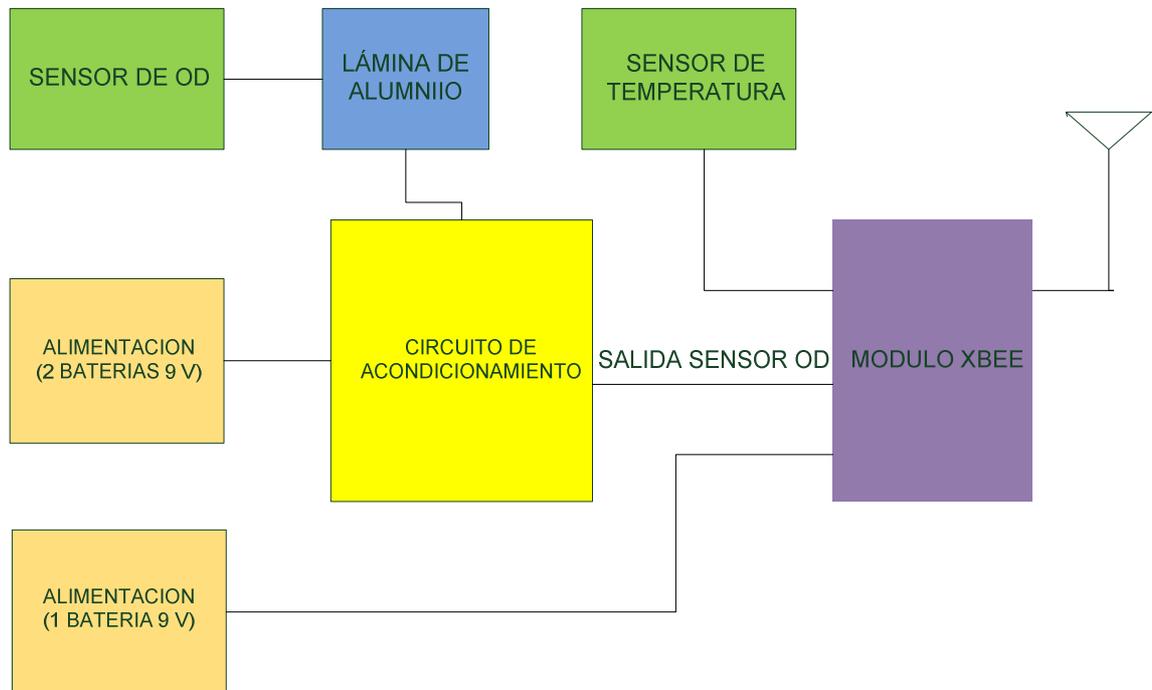


Figura 0.11 Diagrama de bloques de los dispositivos finales 2 y 3

El módulo totalmente integrado se puede observar en la Figura 4.12, donde se implementó las etapas descritas anteriormente dentro de una caja de plástico de dimensiones 17 x 10 cm, a la cual se le ha realizado dos perforaciones que permitan la entrada de la salida de los sensores y un led indicador el cual describe si se encuentra en modo *Sleep* o de transmisión.



Fig

ura 4.12 Integración de los módulos remotos.

4.4.3 Dispositivo enrutador

El módulo Xbee que trabaja como enrutador se encuentra alimentado por una batería de 9 V, los puertos analógicos de este dispositivo no fueron utilizados debido a que la aplicación no lo requiere pero su capacidad si lo permite y podrían trabajar realizando las dos funciones como enrutador y dispositivo final. El diagrama de bloques de este dispositivo se muestra en la Figura 4.13 y fue instalado a 30 metros del nodo coordinador, permitiendo la conexión de mensajes desde el Dispositivo 1 y 2 hacia el coordinador.

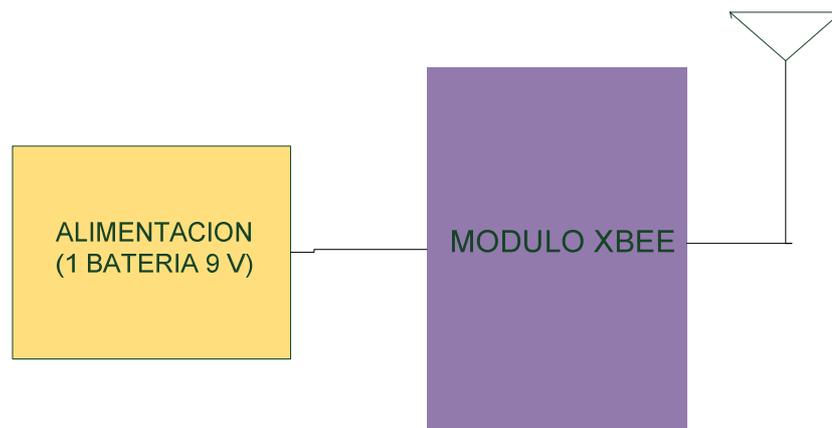


Figura 0.13 Diagrama de bloques dispositivo enrutador

4.4.4 Dispositivo coordinador

La integración del nodo coordinador fue necesaria junto al computador del usuario final, Figura 4.14, dentro de la caseta ubicada en la planta de tratamiento de agua residual, conectada vía Ethernet al computador y con una antena dipolo, le permite comunicarse con los dispositivos finales.

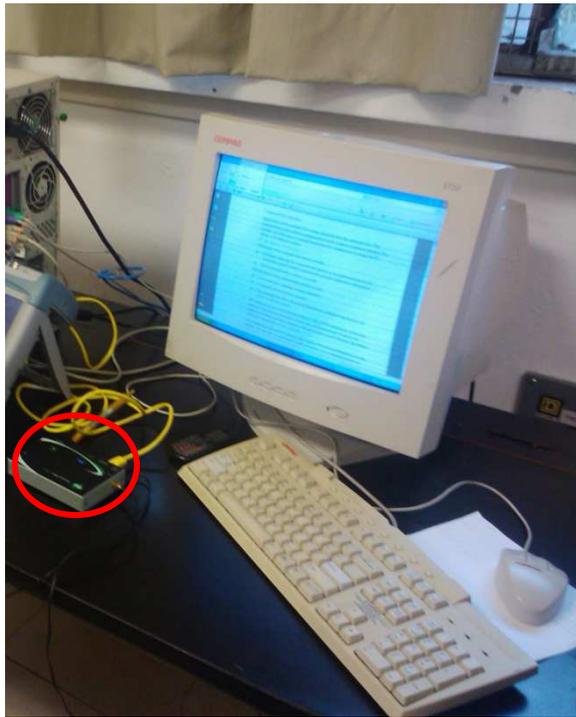


Figura 0.14 Integración del nodo coordinador

4.4.5 Integración del Software

Por otro lado la integración en una PC donde se ejecuta el programa que despliega el HMI y la gestión de red, es decir cargado con los programas de Labview™ y DigiESP™, tal y como se muestra en Figura 4.15. Este computador no necesita altos requerimientos de memoria ya que el servidor se encuentra en la nube de *iDigi™* y los programas ejecutados ocupan 2,58 GB de memoria RAM.



Figura 4.15 Integración de un computador para la interfaz de usuario.

CAPITULO V

PRUEBAS Y RESULTADOS

5.1 PRUEBAS DE COMUNICACIÓN

5.1.1 Prueba de alcance de dispositivos

Uno de los parámetros más importantes a definir en el diseño de una red inalámbrica es el alcance de transmisión, es decir la distancia requerida entre el transmisor (Tx) y el receptor (Rx) para que la comunicación sea confiable.

En la publicación detallada en [3], se analizó la propagación de la señal caracterizando las pérdidas por trayectoria de la señal emitida, considerando los diferentes ambientes de aplicación y los módulos *Xbee* de *Digi*©. El fabricante de estos módulos proporciona la interfaz *X-CTU*, la cual permite realizar una transmisión entre dos dispositivos con un paquete de datos configurable, mostrando si el paquete ha sido entregado o si existe un error de transmisión, permitiendo de esta manera describir el alcance de estos dispositivos.

Esta interfaz permite definir el alcance de los dispositivos en base al número de paquetes exitosos y el nivel de *Received Signal Strength Indicator (RSSI)* del paquete recibido como se observa en la Figura 5.1.

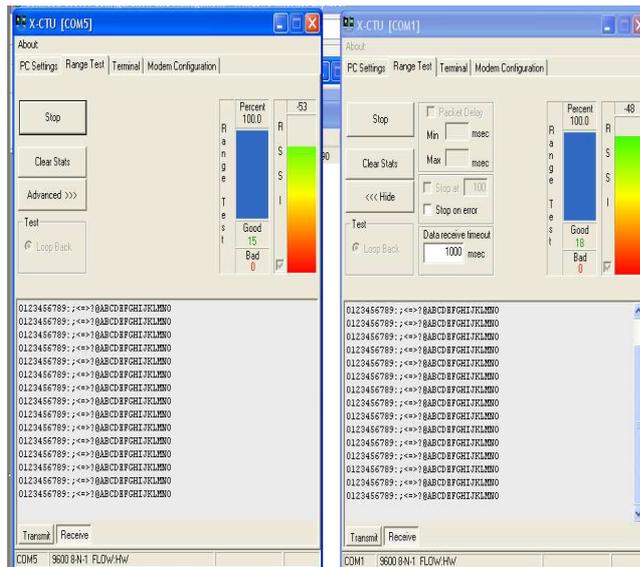


Figura 5.1 Prueba de alcance mediante X-CTU

Las ubicaciones de los dispositivos se muestran en la Figura 5.2, tal y como se especificó en 3.2, para poder validar el alcance máximo de cada uno de ellos se procede con esta prueba de comunicación. El Dispositivo 1 ubicado en el tanque de sedimentación y el nodo coordinador ubicado a 50 metros de éste, muestra menos del 50% de paquetes exitosos, por lo que se justifica la colocación del nodo enrutador a 30 metros del Dispositivo 1, donde se ha comprobado un 100% de paquetes exitosos. Por otro lado el Dispositivo 2 se encuentra ubicado a 60 metros del nodo coordinador y podrá utilizar el mismo nodo enrutador definido anteriormente.

Finalmente con al Dispositivo 3 no hubo necesidad de moverlo debido a que dispone de un módulo *Xbee Series2PRO* de mayor alcance. En base a esta prueba se define que el alcance máximo para dispositivos *Xbee Series2* es de 30 metros y el módulo *Xbee Series2PRO* cumple con un alcance de 100 metros en exteriores.

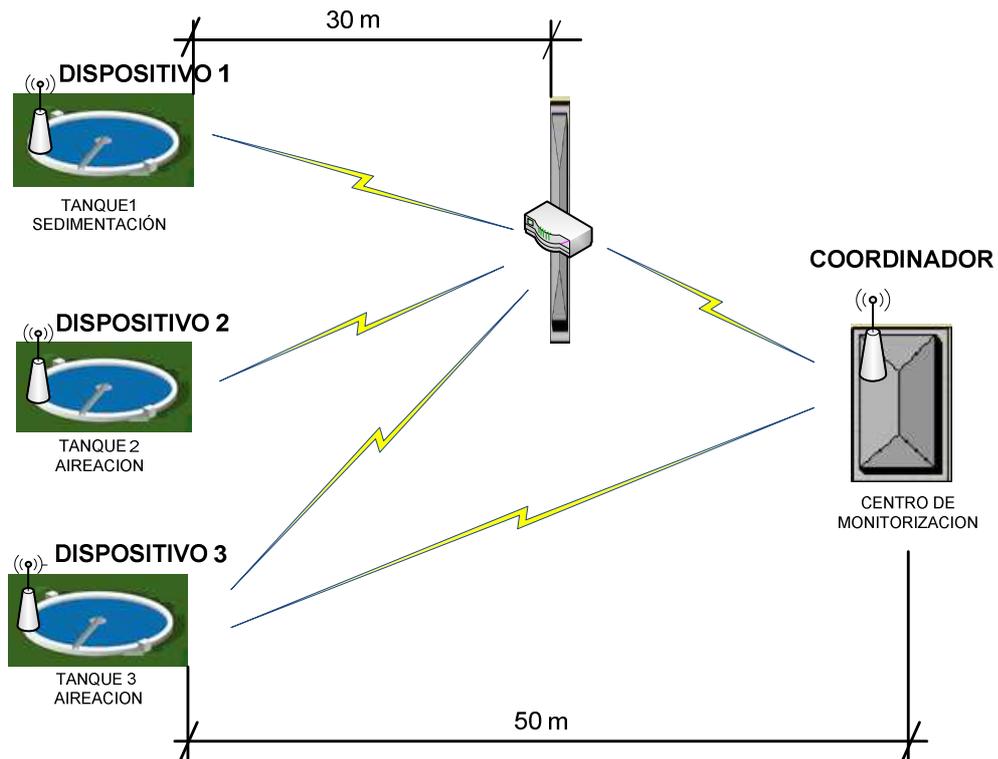


Figura 5.2 Alcance de los dispositivos

5.1.2 Pruebas de inicio de red

Para mostrar el procedimiento de inicio de red se ha realizado algunas pruebas que comprueben dichas etapas, utilizando el *Sniffer* de *Texas Instrument* © para Zigbee, el cual nos permite analizar el tráfico de datos y fotos de los indicadores de estado de los dispositivos.

Una red Zigbee está formada por un coordinador que primero selecciona un canal y un *PAN ID*, que como se describió anteriormente es un identificador de red, luego de que este dispositivo inicie la *PAN*, los enrutadores y dispositivos finales llegan a ser parte de la *PAN*, para luego realizar una validación de seguridad y obtención de las direcciones de 16 bits de los dispositivos, definir las rutas e iniciar la transmisión. Para la cual se definen las siguientes etapas:

a. Barrido de canales

Para el inicio de una red *PAN*, el coordinador desarrolla una serie de escaneos para descubrir el nivel de actividad RF en diferentes canales y descubriendo las redes *PANs* más cercanas.

Cuando un coordinador se prende por primera vez, desarrolla un proceso de escaneo en múltiples canales para detectar el nivel de energía de cada uno, los canales con excesivo nivel de energía es removido de la lista de canales disponibles.

La Figura 5.3, muestra un fragmento del espectro de frecuencias desde 2.4 GHz a 2.48 GHz, tomada en el lugar de implementación para validar este análisis, el mismo que describe el canal libre que escoge Zigbee para trabajar en este entorno. Como se observa los marcadores detallan que el canal libre para este caso es en el penúltimo canal de Zigbee con frecuencia central de 2.75 GHz, el mismo que fue validado al volver a leer la configuración del nodo coordinador y observar que el canal escogido es el mismo que el mostrado libre por el analizador de espectros.

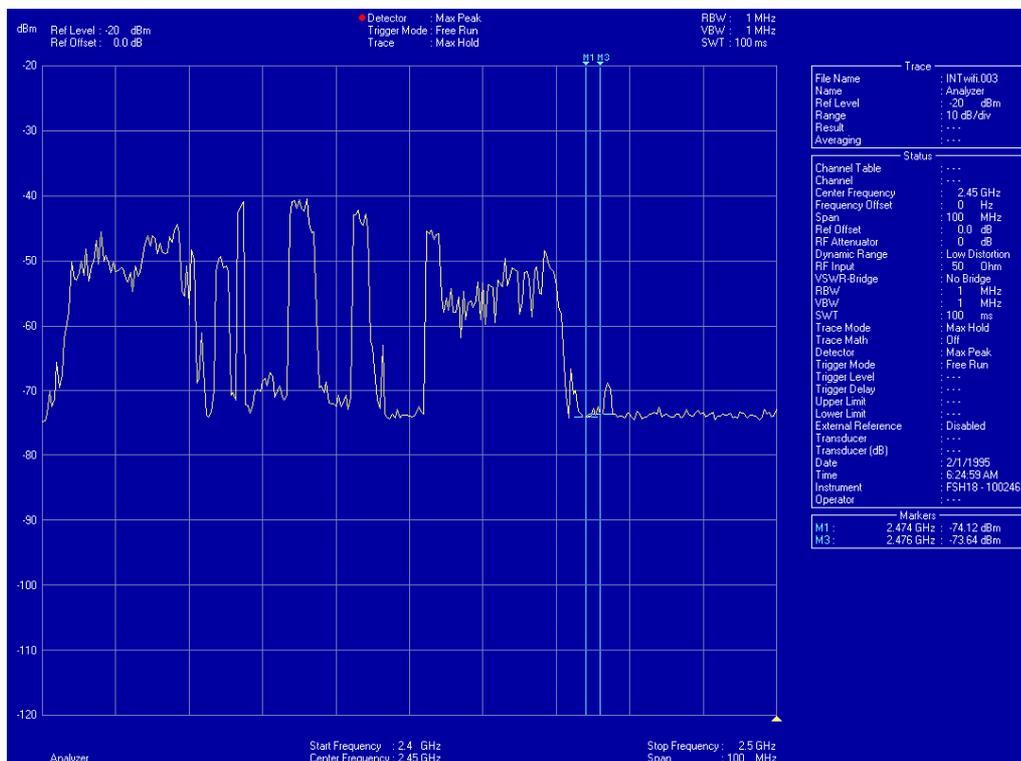


Figura 5.3 Espectro de frecuencias Zigbee

b. Identificación de PANs

La Figura 5.3 describe el proceso de identificación de las PANs, donde el coordinador envía tramas broadcast llamada beacon request para preguntar los PAN ID de las redes cercanas y si estos dispositivos están habilitados para unirse a la red.

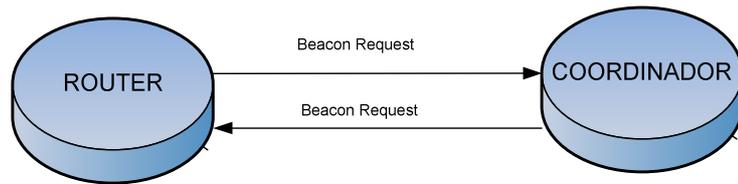


Figura 5.4 Envío de tramas *beacon request* y *beacon*

En la Figura 5.5 se observa un fragmento de las tramas tomadas desde el Sniffer y en las cuales se observa el envío de la trama *beacon request* y *beacon* de uno de los nodos que envía su dirección de *PAN ID*, nivel de *LQI* el cual puede ser cambiado por *RSSI* si se requiere.

Dest. Address	Beacon request	LQI	FCS									
0xFFFF		220	OK									
Source Address	Superframe specification	GTS fields	Beacon payload	Beacon Payload (NWK Layer Decoded)					TX Offset	LQI	FCS	
0x0000	BO SO F.CAP BLE Coord Assoc	Len Permit	00 20 84 01 00 00 00 00	Stk_Prof	P.Ver	Rtr_Cap	Dev.Depth	Dev.Cap	Ext.PANID	[symbols]	220	OK
	15 15 15 0 1 1	0 0	00 00 00 FF FF FF 00	0x0	0x2	0x1	0x0	0x1	0x0000000000000001	0xFFFFFFF		

Figura 5.5 Identificación de PANs

c. Asociación de los dispositivos a la red

Un enrutador y un dispositivo final debe descubrir y unirse a una *PAN*, luego de que el coordinador inicia la red, los enrutadores y dispositivos finales reciben una trama *beacon* con la lista de los dispositivos más cercanos con el objetivo de encontrar una red válida y unírsela.

Posteriormente, luego de comprobar las direcciones de *PAN* habilitadas, envía una petición de asociación al nodo coordinador, el mismo que concede el permiso para unirse a la red. Además es en esta etapa donde el coordinador asigna las direcciones de 16 bits a cada dispositivo, que a su vez tienen una dirección fija de 64 bits, la cual no puede ser cambiada y es la dirección única del dispositivo, lo contrario que la dirección de 16 bits, que se describe como el direccionamiento de capa de aplicación que indica una función particular.

La asociación de red de los dispositivos se puede observar en los mismos módulos, ya que se ha diseñado un led como indicador de asociación de red y se lo puede observar en la Figura 5.6, éste es de color rojo y titila constantemente a partir de que un dispositivo ha terminado el proceso de asociación.

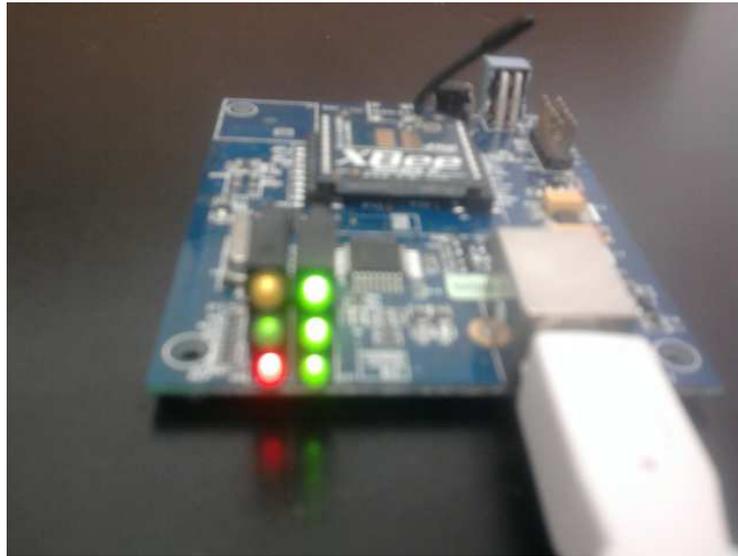


Figura 5.6 Indicador de asociación

Por otro lado, mediante la interfaz web del dispositivo *ConnectPortX4* que permite el acceso al nodo coordinador, se puede realizar el descubrimiento de los nodos asociados, la Figura 5.7 muestra el descubrimiento de nodos manualmente.

ConnectPort X4 Configuration and Management

XBee Configuration

XBee Devices

Gateway Device Details

PAN ID: 0xd33a - 0x0000000000000001
 Channel: 0x0f (2425 MHz)
 Gateway Address: 00:13:a2:00:40:54:f5:05f
 Gateway Firmware: 0x2164

Network View of the XBee Devices

Select a device to configure:

Node ID	Network Address	Extended Address	Node Type	Product Type
[5ec7]!		00:13:a2:00:40:33:04:0a!	end device	
[bad3]!		00:13:a2:00:40:4b:87:2d!	end device	
[11c0]!		00:13:a2:00:40:2c:1a:42!	router	Unspecified
CoordGate	[0000]!	00:13:a2:00:40:54:f5:05f	coordinator	X4 Gateway

1 coordinator, 1 router, 2 end devices

Discover XBee Devices Device discovery in progress. Please wait...

Clear list before discovery

Gateway Firmware Update

OTA Firmware Update Setup

OTA Firmware Update Status

Figura 5.7 Descubrimiento de nodos en la interfaz del coordinador

d. Comprobación de seguridad

El coordinador inicia usando 128-bit *AES* encriptación por clave, permitiendo que solo los dispositivos que cuenten con esta clave puedan comunicarse en la misma *PAN*. Dicha clave fue asignada a cada dispositivo mediante configuración previa.

Se puede observar la trama enviada mediante la captura de tráfico realizada con el *Sniffer* como se muestra en la Figura 5.8, en la cual se visualiza la dirección origen y destino del paquete de datos, además de los datos encriptados, los valores de *RSSI* y *Link quality indicator (LQI)*.

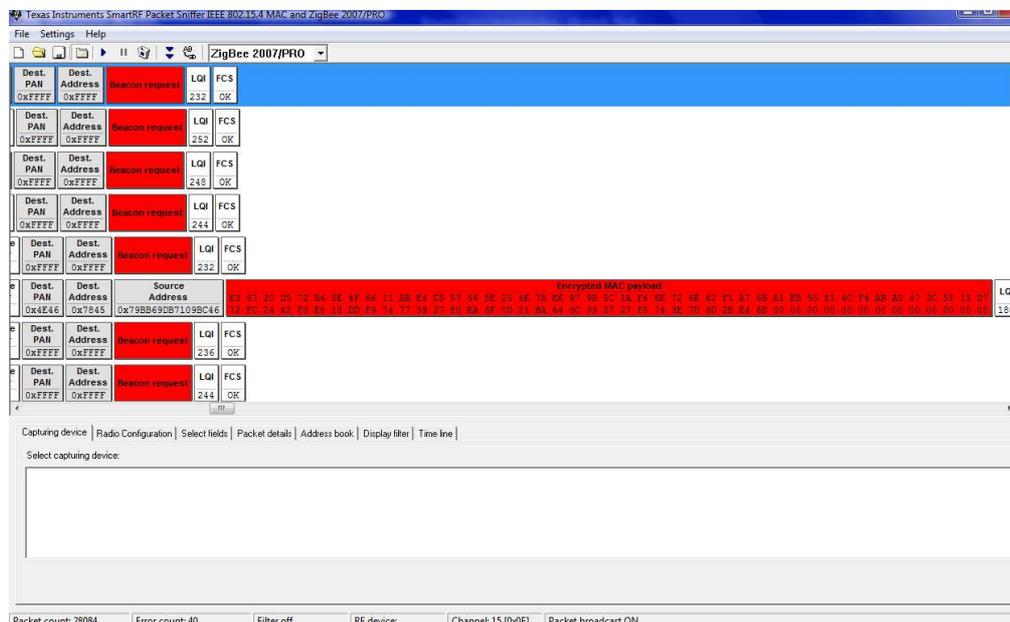


Figura 5.8 Captura de tramas con seguridad

e. Descubrimiento de rutas

Para definir las rutas activas, el nodo coordinador inunda la red con transmisiones *broadcast* con el fin de descubrir las diferentes rutas entre el origen y destino, basadas en el protocolo *AODV*.

Para observar esta transmisión se obtuvo las rutas desde una interfaz de Telnet que permite conectarse al nodo coordinador y ejecutar el comando *Xbee route*, de esta manera se muestra la ruta que utiliza el paquete enviado.

f. Transmisión de datos

Luego de descubrir las rutas hábiles, se inicia la transmisión de los paquetes desde los dispositivos finales hacia el coordinador, la Figura 5.9 muestra la transmisión y recepción de los mensajes desde la interfaz de DigiESP™ que ejecuta el programa de gestión de red, el cual incluye el envío a la base de datos de *Digi Cloud™* mediante código XML.

```

108 # Now print out each battery voltage, checking to make sure data
109 for key in node_values.keys():
110     voltage = node_values[key]
111     if voltage is not None:
112         print "%s: %3.3f" % (key, voltage,)
113         enviadatabase(key,voltage)
114     else:
115         print "%s: No data" % (key,)
116
117
118 # Method called when a sample is received from the network
119 def handle_sample(node_addr, node_values, packet):
120     # The XBeeIOsample class is used to parse XBee sample packets
121     sample = XBeeIOsample(packet)
122
123     # We use get_analog_pin to extract the supply voltage from the
124     supply = sample.get_analog_pin('A00')
125
126     # Save the updated value in the dictionary
127     node_values[node_addr] = supply
128
129
130
131
132 def enviadatabase(key,voltage):
133     collection = "device_stats"
134     counter = 0
135     max_files = 10
136
137     while True:
138         # this is the rol request that will return device statistics
139         request = "<rol_request version='1.1'><query_stats><device_

```

Figura 5.9 Transmisión de datos desde los dispositivos finales

Se puede validar la comunicación hacia el servidor mediante la misma interfaz del coordinador como se muestra en la Figura 5.10, donde se puede notar el estado de la conexión.

ConnectPort X4 Configuration and Management

System Information

- General
- Serial
- Network
- iDigi**

The following information can be used to monitor connection status for the iDigi Service.

To configure iDigi Service, use the iDigi Configuration page in the Configuration area.

To disconnect a connection to an iDigi Server, or to cancel a wait or listener, visit the Connections page in the Management area.

Current iDigi Connection Status

Device Type:	ConnectPort X4
Device ID:	00000000-00000000-00409DFF-FF3BAABA
Status:	Connected to 50.56.41.153:3199 from 10.17.144.235:36700
Server URL:	en://developer.idigi.com
Connection Type:	Device-initiated
Connection Method:	TCP/SSL
Connected For:	00:15:23
Receive Idle For:	00:00:14
Send Idle For:	00:00:23

- Position
- XBee Network
- Diagnostics

Figura 5.10 Interfaz de verificación de conexión al servidor

Por otro lado también es posible comprobar la comunicación mediante el comando ping desde la pestaña de consola, como se observa en la Figura 5.11

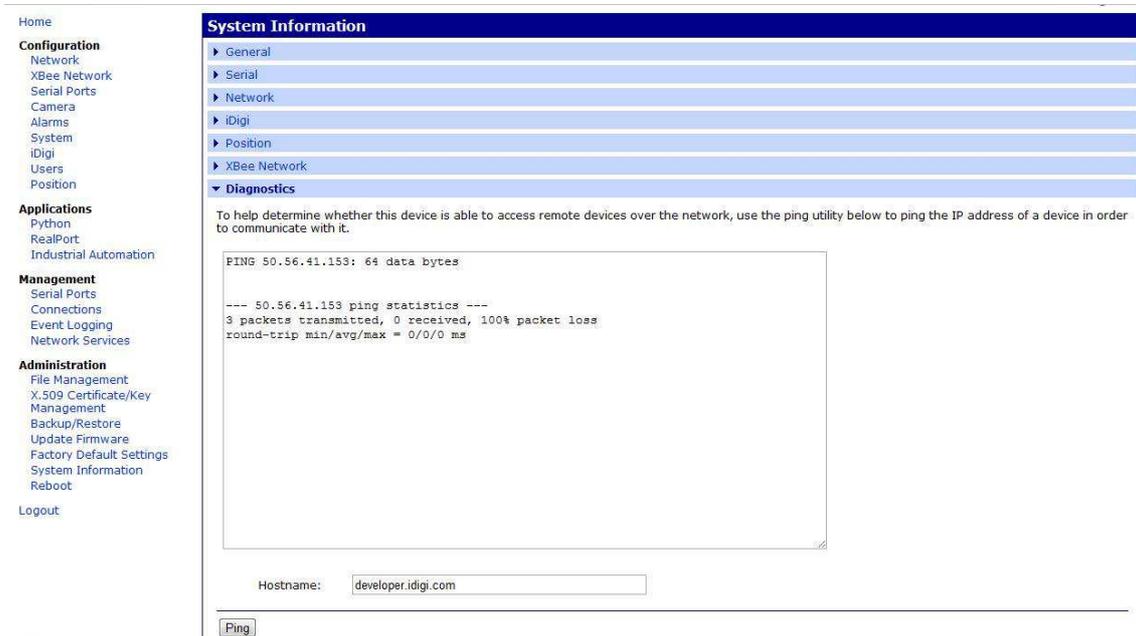


Figura 5.11 Consola para enlace con el servidor *iDigi™ cloud*

5.2 ADQUISICIÓN DE DATOS

Para esta prueba fue recolectada la información correspondiente a un día completo de trabajo del sistema en la planta de tratamiento. Como ya se mencionó el programa en Python™ lee los datos recibidos por cada dispositivo, los convierte en información correspondiente a los parámetros de medición y los sube al servidor de *iDigi™*, en donde es creado un archivo de almacenamiento para cada dispositivo final de la red. Ya que estos *logs* incluyen la hora y la fecha medición, es posible observar que la respuesta de la red es prácticamente inmediata ante la petición de los datos por parte del coordinador, cumpliendo así con la frecuencia de muestreo configurada en los dispositivos finales, al igual que el número de muestras tomadas en cada ciclo.

En la Figura 5.12 se aprecia el archivo de almacenamiento para el Dispositivo1, el cual realiza mediciones de pH en el tanque de desinfección. Las primeras mediciones fueron realizadas para calibración con las soluciones base con pH de 7, 10 y 4.

Timestamp	Device ID	Value 1	Value 2	Value 3	Value 4	Value 5
00:13:a2:00:40:33:04:0a	6,73597802734	NA	NA	23,4123044875	07:04:22	17 May 2012
00:13:a2:00:40:33:04:0a	6,73597802734	NA	NA	23,7980281251	07:04:24	17 May 2012
00:13:a2:00:40:33:04:0a	6,77959462891	NA	NA	23,3242187552	07:05:36	17 May 2012
00:13:a2:00:40:33:04:0a	6,82221123047	NA	NA	23,2563476663	07:08:37	17 May 2012
00:13:a2:00:40:33:04:0a	9,94179824219	NA	NA	23,5444335938	07:12:42	17 May 2012
00:13:a2:00:40:33:04:0a	9,94179824219	NA	NA	23,4630959375	07:12:43	17 May 2012
00:13:a2:00:40:33:04:0a	9,96660654297	NA	NA	23,5444335938	07:16:15	17 May 2012
00:13:a2:00:40:33:04:0a	9,97137333884	NA	NA	23,5417382813	07:16:17	17 May 2012
00:13:a2:00:40:33:04:0a	9,91598994141	NA	NA	23,9003906254	07:20:08	17 May 2012
00:13:a2:00:40:33:04:0a	9,91785494141	NA	NA	23,9003906254	07:20:09	17 May 2012
00:13:a2:00:40:33:04:0a	3,91451552734	NA	NA	24,1376953225	07:24:28	17 May 2012
00:13:a2:00:40:33:04:0a	3,91432822812	NA	NA	24,1563476663	07:24:30	17 May 2012
00:13:a2:00:40:33:04:0a	3,98813212891	NA	NA	24,3753457563	07:28:15	17 May 2012
00:13:a2:00:40:33:04:0a	3,98813212891	NA	NA	24,3753457563	07:28:16	17 May 2012
00:13:a2:00:40:33:04:0a	4,00994042969	NA	NA	24,2753445873	07:32:23	17 May 2012
00:13:a2:00:40:33:04:0a	4,09717363281	NA	NA	24,3936523438	07:32:25	17 May 2012
00:13:a2:00:40:33:04:0a	4,05355703125	NA	NA	24,4123044875	07:36:33	17 May 2012
00:13:a2:00:40:33:04:0a	4,07285703125	NA	NA	24,4354066841	07:36:35	17 May 2012
00:13:a2:00:40:33:04:0a	7,17214404297	NA	NA	24,4257812534	07:40:19	17 May 2012
00:13:a2:00:40:33:04:0a	7,171146372331	NA	NA	24,4278341263	07:40:20	17 May 2012
00:13:a2:00:40:33:04:0a	7,13753457563	NA	NA	24,4315412534	07:44:37	17 May 2012
00:13:a2:00:40:33:04:0a	7,141146354593	NA	NA	24,4257812513	07:44:40	17 May 2012
00:13:a2:00:40:33:04:0a	7,14234677528	NA	NA	24,5325781282	07:48:12	17 May 2012
00:13:a2:00:40:33:04:0a	7,14217452347	NA	NA	24,5297834456	07:48:13	17 May 2012
00:13:a2:00:40:33:04:0a	7,13240923493	NA	NA	24,4357238395	07:52:26	17 May 2012
00:13:a2:00:40:33:04:0a	7,12345923045	NA	NA	24,4314293483	07:52:28	17 May 2012
00:13:a2:00:40:33:04:0a	7,23598209755	NA	NA	24,46233953495	07:56:19	17 May 2012
00:13:a2:00:40:33:04:0a	7,23458723955	NA	NA	24,46217495948	07:56:20	17 May 2012
00:13:a2:00:40:33:04:0a	7,26620933452	NA	NA	24,4604787264	08:00:26	17 May 2012
00:13:a2:00:40:33:04:0a	7,24569095609	NA	NA	24,4357812832	08:00:28	17 May 2012
00:13:a2:00:40:33:04:0a	7,23543287325	NA	NA	25,0123044875	08:04:22	17 May 2012
00:13:a2:00:40:33:04:0a	7,23592507023	NA	NA	25,0298281251	08:04:24	17 May 2012
00:13:a2:00:40:33:04:0a	7,12349203483	NA	NA	25,3242187552	08:08:36	17 May 2012
00:13:a2:00:40:33:04:0a	7,122346326734	NA	NA	24,4563476663	08:09:37	17 May 2012
00:13:a2:00:40:33:04:0a	7,19186324877	NA	NA	24,5244335938	08:12:43	17 May 2012
00:13:a2:00:40:33:04:0a	7,19324823054	NA	NA	23,4630959375	08:12:43	17 May 2012
00:13:a2:00:40:33:04:0a	7,15224602393	NA	NA	25,3414238323	08:16:15	17 May 2012

Figura 5.12 Captura de archivo de datos del Dispositivo 1 cargado en el servidor iDigi@.

En la Figura 5.12 se logra observar la hora exacta en el que las muestras llegan al dispositivo coordinador. El intervalo de tiempo entre cada medición coincide de manera muy precisa con el tiempo de *Sleep* configurado en los dispositivos finales (4 minutos), sin embargo se aprecia un mínimo retardo en segundos ocasionado por factores ambientales u obstáculos en la trayectoria que influyen en el tiempo de latencia del sistema.

Del mismo modo se evidencia la toma de dos muestras por cada ciclo, una por cada segundo dentro del período que se encuentra despierto el dispositivo, sin embargo existieron ocasiones en donde varía este retardo y se demora dos segundos en recibirlo.

Otra razón para la generación de este retardo y a la variación del mismo es tiempo de procesamiento de los dispositivos, pues estar habilitado el cifrado en la transmisión de los datos, los dispositivos tienen que descifrar y volver a cifrar el mensaje por cada salto en su trayectoria. Una solución para esto sería adquirir un procesador que posea mayor capacidad que el actualmente utilizado en los módulos, el procesador MC9S08QE32 (*core HCS08*) de *Freescale*, el cual trabaja a una velocidad de reloj de 50.33MHz.

No existieron saltos o brechas en la recepción de las mediciones lo que significa que significa que no hubo pérdida de conexión en ningún momento de la prueba.

5.3 VALIDACIÓN DE DATOS

5.3.1 Calibración del sistema

Para analizar el nivel de precisión del prototipo de red para monitorización de la calidad del agua, se realizaron pruebas con otro sistema de adquisición y análisis de muestras que se encuentra en los laboratorios del CAALC, el cual es utilizado para analizar las muestras que son tomadas en la planta residual. De esta manera se desarrolló una comparación entre la medición de los parámetros pH, OD y temperatura en los dos sistemas y así encontrar su grado de error.

Tabla 5.1 Validación de datos con el Sistema Actual

Parámetro	Solución	Condición de temperatura	Sistema estático del Centro del Agua	Prototipo de monitorización con tecnología Zigbee	Porcentaje de error
PH (unidades de PH)	Base de PH =4	25	3,98	4,01	0,75 %
	7	25	6,80	7,01	3.08 %
	10	25	9,88	10,01	1.31 %
OD (mg/l)	Aire	25	99,7	99,2	0.5 %
	Agua Saturada	25	100,2	100,01	0.18 %
Temperatura	29	-	29,5	28,9	2.03 %

En la Tabla 5.1, se detalla los valores de las muestras obtenidas en el prototipo y los resultados del sistema con el que cuenta el ITESM. Por lo tanto podemos notar que el porcentaje de error promedio es de 1.31 %, esto debido a la calibración de las funciones de escalabilidad. Sin embargo caber recalcar que el fabricante del sistema con el que actualmente trabajan recomiendan primeramente calibrarlos y luego medir otras muestras.

El error generado se debe a la etapa de escalamiento, debido a que se realizaron funciones de transferencia tomando en consideración los valores teóricos de las muestras estándar de 4, 7 y 10 para el caso del pH y al encontrar la función exponencial que caracteriza la concentración de oxígeno disuelto dada la variación de la temperatura del agua.

5.3.2 Recolección de datos

Los valores que se muestran en la Tabla 5.2, son el resultado de las muestras analizadas en el laboratorio para la comparación entre el sistema actual y el prototipo, realizando la calibración tomando en cuenta como valores referenciales los adquiridos en el sistema estático del CAALC.

Tabla 5.2 Calibración del sistema.

Parámetro	Punto de muestreo	Sistema estático del Centro del Agua	Prototipo de monitorización con tecnología Zigbee	Porcentaje de error
pH (Unidades de pH)	Agua residual (tanque de desinfección)	7,42	7,33	1,21 %
Temperatura (°C)	Agua residual (tanque de desinfección)	26,71	26,62	0,33 %
OD (mg/L)	Agua residual (tanque de aireación 1)	7,59	7,55	0,52 %
Porcentaje de Saturación (%)	Agua residual (tanque de aireación 1)	93,82	92,7	1,19%
Temperatura °C	Agua residual (tanque de aireación 1)	26,84	26,65	0.70 %
OD(mg/L)	Agua residual (tanque de aireación 2)	7,95	7,90	0,62%
Porcentaje de Saturación (%)	Agua residual (tanque de aireación 2)	96,4	95,9	0,51%
Temperatura °C	Agua residual (tanque de aireación 2)	24,91	25,36	1,80 %

La Figura 5.13 muestra a su izquierda el sistema actual utilizado por el personal de laboratorio del CAALC y a la derecha el prototipo de red inalámbrica Zigbee diseñado para esta aplicación.

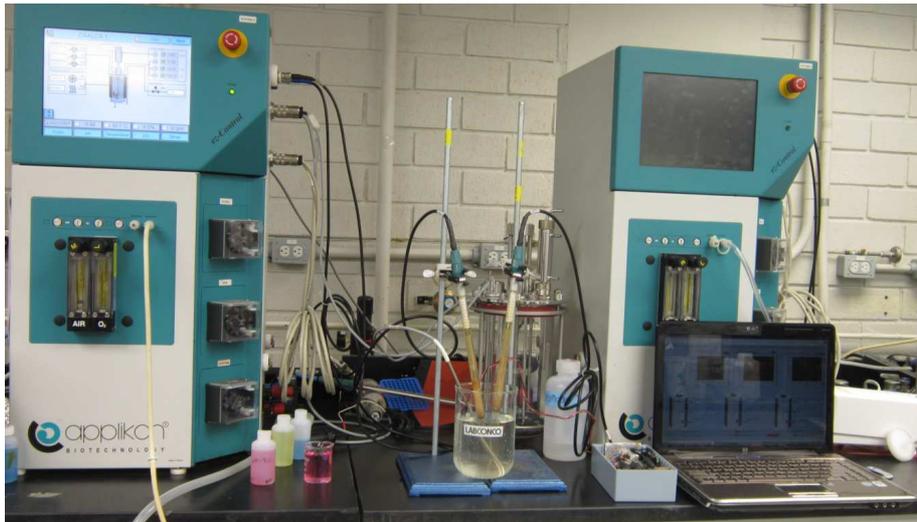


Figura 5.13 Validación de los datos con otro sistema

En los resultados de las mediciones de los mismos parámetros en el agua proveniente del escenario real de pruebas, se muestra un porcentaje de error promedio de 0,86% como lo muestra la Tabla 5.2, lo cual se podría disminuir aún más optimizando las etapas de acondicionamiento de la señal y las funciones de escalabilidad utilizadas.

5.4 ANÁLISIS DE CONSUMO DE ENERGÍA

Para este análisis se ha tomado en consideración dos aspectos: el consumo de corriente del dispositivo final y el consumo de corriente del módulo completo, el cual incluye también al circuito acondicionador. En la Figura 5.14 se observa cómo fue realizada la medición de corriente consumida por los dispositivos.

Las fórmulas definidas a continuación no tienen en cuenta varios parámetros importantes como auto-descarga de la batería y escapes internos, que afectan al consumo real y la duración de la batería. Así, las fórmulas deben utilizarse como una guía aproximada en estimar una capacidad apropiada de batería para una aplicación determinada.

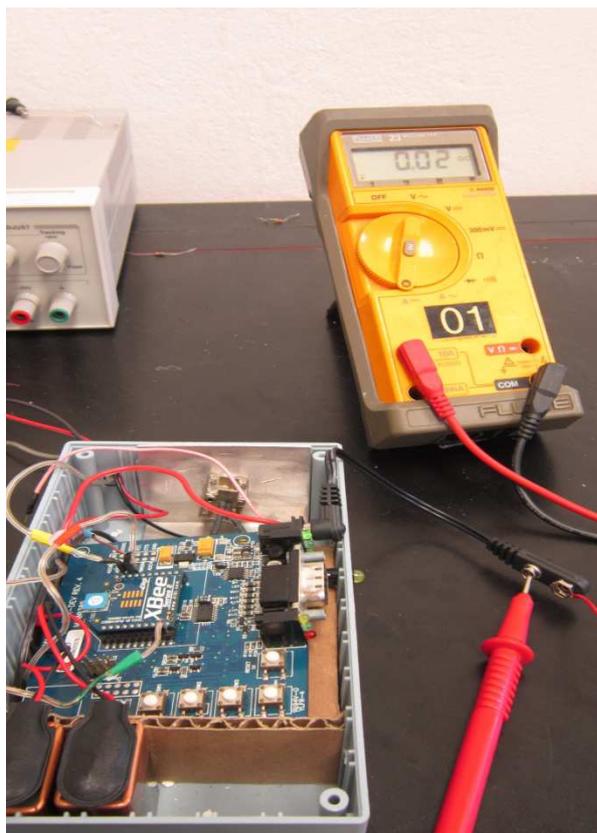


Figura 5.14 Consumo de corriente.

Para obtener el valor de corriente promedio consumida se debió definir los siguientes parámetros: capacidad de las baterías 2Ah, duración del ciclo 242 s y T_{sleep} : 240 s.

Tabla 5.3 Corriente consumida por el dispositivo final.

Modo de Operación	Corriente Consumida	Corriente Promedio Consumida
Sleep on	7.70mA	7.96mA
Sleep off	40mA	

Las Tablas 5.4 y Tabla 5.5 muestran el consumo de corriente correspondiente a los módulos completos de medición de pH y OD. Se encuentra la corriente mínima y máxima por ciclo de trabajo del dispositivo final, dependiente del estado operación del mismo.

Tabla 5.4 Corriente consumida por el módulo medidor de pH.

Dispositivo	Corriente Consumida	Corriente Total (mA)	
		Mínima	Máxima
XbeeSleep on	7.98mA	51.98	144
XbeeSleep off	100mA		
Circuito pH (V-)	9mA		
Circuito pH (V+)	35mA		

Se realiza el mismo procedimiento para medir la corriente consumida en el módulo medidor de OD. Se muestran los resultados en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5 Corriente consumida por el módulo medidor de OD.

Dispositivo	Corriente Consumida	Corriente Total (mA)	
		Mínima	Máxima
XbeeSleep on	7.98mA	40.98	133
XbeeSleep off	100mA		
Circuito OD(V-)	5mA		
Circuito OD(V+)	28mA		

La Ecuación 7 es utilizada para calcular la duración de la batería para una capacidad y un ciclo de trabajo determinados.

$$T_{\text{Tiempo de Autonomía}} = \frac{\text{Capacidad de la Batería (Ah)}}{\text{Corriente Promedio Consumida (A)}} \quad (7)$$

$$C_{\text{Corriente Promedio Consumida}} = \frac{I_{\text{sleep}} \cdot T_{\text{sleep}} + I_{\text{despierto}} \cdot T_{\text{despierto}}}{\text{Tiempo total de ciclo}} \quad (8)$$

Para saber cuánto durarán las baterías se debe saber la capacidad de la misma y la corriente promedio, la cual está representada por la Ecuación 8 y toma en consideración el tiempo que se ha determinado para que duerma el dispositivo final que es de 4 minutos y el tiempo que permanece despierto que es 2 segundos. Las baterías utilizadas tienen una capacidad de 2Ah.

Tabla 5.6 Corriente promedio y tiempo de autonomía de las baterías normales.

BATERÍA	ST Time (s)	SP Time (s)	Capacidad de Batería (Ah)	Corriente Promedio Consumida (mA)	Tiempo de Autonomía (h)
Xbee Series2	2	240	2	8.74	288
pH V(+)	2	240	2	35	57
pH V(-)	2	240	2	9	222
OD V(-)	2	240	2	5	400
OD V(+)	2	240	2	28	71

Como se puede visualizar en la Tabla 5.6 no se consigue el tiempo deseado de autonomía en los módulos de medición de pH y OD. Se intenta alargar este tiempo mediante el uso de baterías de mayor capacidad. La Tabla 5.7 muestra los resultados obtenidos.

Tabla 5.7 Corriente promedio y tiempo de autonomía utilizando baterías industriales.

BATERÍA	ST Time (s)	SP Time (s)	Capacidad de Batería (Ah)	Corriente Promedio Consumida (mA)	Tiempo de Autonomía (días)
Xbee Series2	2	240	19	8.74	90.5
pH V(+)	2	240	19	35	22
pH V(-)	2	240	19	9	87
OD V(-)	2	240	19	5	79
OD V(+)	2	240	19	28	28

Como se puede visualizar en las dos últimas tablas que a pesar de aumentar la capacidad de las baterías, el tiempo de duración de las mismas sigue siendo muy corto comparándolo con el tiempo que indica el estándar de un año. Esto sucede por la gran cantidad de

corriente consumida por los circuitos de acondicionamiento, el uso de amplificadores y reguladores de voltaje incluyen un consumo de potencia indeseable en un sistema que se requiere que sea autónomo.

Una alternativa para controlar el desgaste anticipado de las baterías sería el uso de componentes electrónicos de bajo consumo para los circuitos de acoplamiento que según los resultados son los que más consumen energía. Estos deberían poder habilitar la funcionalidad de *shut down*, esto quiere decir, que al igual que los dispositivos finales tienen la capacidad de dormir cuando se encuentren en desuso.

5.3 ANÁLISIS DE COSTOS

El presente análisis se trata de realizar un presupuesto del sistema de monitorización de la calidad de agua.

Se tomó en cuenta los materiales utilizados para la integración de cada etapa del sistema, pero no se ha considerado recursos humanos ni licencias para los programas utilizados, acceso al servidor y fiscalización, debido a que estos parámetros fueron solventados mediante recursos académicos e investigativos dentro de una institución de educación superior *ITESM*.

Tabla 5.8 Costos de ejecución al sistema

Cantidad	Material	Costo Unitario	Costo Total
Dispositivos y Elementos de Red			
4	Xbee Pro ZB Módulo Zigbee	\$34,00	\$136,00
1	ConnectPort X4 - XBee to Ethernet	\$384,00	\$384,00
1	Cable de Red	\$5,00	\$5,00
Circuitos de Acoplamiento y Protección OD			
1	LF412 OPAM	\$1,08	\$1,08
1	79L05 Regulador Voltaje Negativo	\$0,10	\$0,10
2	Capacitores 1uF	\$0,05	\$0,10
1	Potenciómetro 2M Ω	\$3,50	\$3,50
5	Resistencias 1/2 W	\$0,03	\$0,15
2	1N004 diodos 0.7V	\$0,15	\$0,30
1	TL082 OPAM	\$1,15	\$1,15
2	Baterías 9 V	\$3,75	\$3,75
Circuitos de Acoplamiento y Protección Ph			
1	TL072 OPAM	\$1,25	\$1,25
6	Resistencias 1/2 W	\$0,03	\$0,18
1	Capacitores 1.5uF	\$0,05	\$0,05
2	Baterías 9 V	\$3,75	\$3,75
2	1N004 diodos 0.7 V	\$0,15	\$0,30
1	Resistencia 1/2 W	\$0,03	\$0,03
Circuito Protección Temperatura			
2	1N004 diodos 0.7 V	\$0,15	\$0,30
1	Resistencia 1/2 W	\$0,03	\$0,03
Elementos Sensores			
1	Sensor Ph Applikon	\$470,00	\$470,00
1	Sensor OD Applikon	\$640,00	\$640,00
3	LM35DP	\$3,40	\$10,20
Complementos			
4	Cajas Plásticas Herméticas STEREN	\$7,30	\$29,20
		TOTAL	\$1.686,94

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

SISTEMA DE MONITORIZACIÓN DE CALIDAD DE AGUA

Se confirmó la factibilidad de la implementación de una red inalámbrica para su aplicación en el área ambiental. El proceso de monitorización de parámetros de la calidad del agua en la planta de tratamiento de aguas residuales es ahora un proceso más eficiente, confiable y seguro que el proceso tradicional que se realizaba anteriormente.

El desarrollo de este sistema permitió conocer y almacenar los datos recolectados de los sitios remotos en tiempo real considerando la sincronización entre el tiempo de *Sleep* de los módulos y el tiempo de respuesta de los sensores, de esta manera se logró el cumplimiento del periodo de muestreo diario que especifica la norma mexicana de aguas residuales NMX-AA-003-1980.

El análisis realizado previo a la unificación del sistema recopilado en el artículo “Consideraciones esenciales para el diseño de redes Zigbee”, donde se tomó en cuenta características fundamentales como: latencia en red con seguridad, interferencias con redes Wi-Fi[®], calidad del enlace, propagación y alcance; brindó bases experimentales y criterios de diseño relevantes para la implementación del sistema en el entorno de aplicación requerido.

El principal desafío encontrado en la ejecución de este tipo de aplicaciones es el trabajo interdisciplinario que se requiere. Fue importante involucrarse en el estudio de los conceptos y procedimientos correspondientes al área ambiental, permitiendo el entendimiento de los objetivos y el alcance de la implementación.

TECNOLOGÍA ZIGBEE/IEEE 802.15.4

La utilización de la topología malla de Zigbee, permitió crear la red de monitorización planteada, evitando fallas en la conexión a través del protocolo de enrutamiento AODV que emplea esta tecnología, la cual permite la auto-recuperación de la red.

Se corroboraron los motivos por cuales los dispositivos Zigbee son ahora utilizados como elementos de uso primario por consultores especialistas en ahorro de recursos y energía. Estos motivos son principalmente: el tiempo, costo de instalación y mantenimiento, el tiempo de puesta en marcha de los sistemas, el ahorro importante de energía al estar en modo *Sleep* y la versatilidad de adaptación en diversos escenarios.

Existen todavía muchas áreas de interés para el aprovechamiento de esta tecnología, algunas incluso que todavía no han sido exploradas. El principal inconveniente será siempre el desconocimiento generalizado acerca del manejo y manipulación especializada de las redes inalámbricas de sensores. En el caso de que se llegase a requerir algún tipo de soporte, en general es aún muy difícil conseguir personal capacitado que se encuentre familiarizado con el uso de esta tecnología.

HARDWARE

El principal inconveniente que se encontró al probar el sistema integrado, es el consumo significativo de energía provocado por los circuitos de acondicionamiento, reguladores y amplificadores que forman la placa de interfaz de Zigbee; los cuales provoca una reducción notablemente en la capacidad de las baterías, y por lo tanto de los módulos de medición.

En base al estudio de consumo de energía realizado se optó por efectuar un nuevo análisis de consumo con baterías de mayor capacidad 19 Ah, lo cual dio como resultado un tiempo de autonomía promedio de 61,3 días; el tiempo de duración de las baterías sigue siendo muy corto en comparación con el tiempo de una año que especifica el estándar.

A lo largo del proyecto se pudo evidenciar que las características y funcionalidades de un producto se ven limitadas por su costo, es decir que la utilización de dispositivos de mejores características, implican un aumento en el costo de implementación. Fue importante realizar el diseño de los circuitos de acoplamiento balanceando ambos aspectos hasta lograr cubrir satisfactoriamente los requerimientos sin exceder el presupuesto establecido.

SOFTWARE

La programa desarrollado en PythonTM y cargado al dispositivo coordinador de la red permitió realizar el descubrimiento y lectura de las compuertas analógicas correspondientes dispositivos finales, además se pudo realizar la conversión de estas lecturas a valores ingenieriles y almacenarlos en el servidor iDigiTM con el respectivo número de identificación, fecha y hora de muestreo.

La interfaz de usuario desarrollada en este proyecto utilizando la herramienta de LabviewTM, permitió la visualización en tiempo real de los parámetros definidos para la monitorización de la calidad de agua, proporcionando al usuario gráficas, históricos, alarmas e históricos de alarmas de los eventos que se producen durante el día en base a los parámetros permitidos para el proceso de tratamiento de agua residual.

RECOMENDACIONES

Optimizar los circuitos de acondicionamiento de las señales provenientes de los sensores de pH y OD con el reemplazo de componentes de bajo consumo de energía. Con ello se logrará un mayor tiempo de autonomía de los módulos.

Las placas de interfaz XBIB-R del kit de desarrollo adquirido por el *ITESM* y utilizadas para este proyecto, contienen componentes adicionales de protección, botones y leds, que en esta aplicación no fueron utilizados, por lo cual se recomienda para posteriores trabajos la creación de tarjetas de interfaz propias que provoquen menor consumo de energía y que de igual manera protejan al módulo Xbee Series 2/PRO.

El estado del arte de esta tecnología permite la utilización de módulos de red que ya no requieren circuitos de acondicionamiento externos, debido a que incluyen en un mismo módulo el elemento sensor, el transmisor y el circuito acondicionador. Este tipo de solución es conocida con el nombre de *WirelessHART*[®] y cuyo tiempo de autonomía puede llegar a ser de hasta 5 años al utilizar baterías de litio combinadas con cloruro de tionilo. El inconveniente al utilizar esta tecnología es su elevado costo de adquisición pero puede ser considerado para posteriores aplicaciones.

El escalamiento de la red es factible analizándolo desde el punto de vista de capacidad de Zigbee; sin embargo es necesario un análisis minucioso de las variantes del sistema como: el costo de almacenamiento en la base de datos para más de cinco dispositivos, inclusión de subredes, capacidad de procesamiento del nodo coordinador, sincronización de los tiempos de *Sleep* de todos los dispositivos finales, sistema de energía de mayor rendimiento y optimización de los circuitos de acondicionamiento de señales.

Al trabajar con sensores basados en electrodos sensibles al tacto y a la interferencia electromagnética fue importante aislar la conexión del sensor del circuito acondicionador mediante una placa de metal para no afectar la integridad de la medición.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] 21 ideas for the 21st century, *Business Week*, p. 167, 30 Agosto 1999.
- [2] Z. Alliance, Especificación Zigbee, San Ramón: Version r17, Enero 2008.
- [3] Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, <http://www.itesm.edu/wps/wcm/connect/Campus/MTY/Monterrey/>.
- [4] Centro del Agua para Latinoamérica y el Caribe, <http://www.centrodelagua.org/home.aspx>.
- [5] D. Contero, A. Albarracín, "Consideraciones esenciales para el Diseño de Redes Zigbee", *Congreso Ciencia y Tecnología ESPE*, 2012.
- [6] Standard IEEE 802.15.4, *IEEE*, 2003.
- [7] Python™ Programming Language, www.python.org.
- [8] J. Adams, "Busy as a Zigbee", *IEEE Spectrum*, p. 1, 2006.
- [9] E. M. B.-R. a. S. R. D. C. E Perkins, "AdHoc On-Demand Distance Vector Routing", *Request for Comments: 3561*, July 2003.
- [10] iDigiCloud, iDigi™, www.iDigi.com.
- [11] N. Instruments®, Labview™ 2010, www.ni.com.
- [12] L. A. B. Inclán, "UNIDAD DIDÁCTICA PARA LA APLICACIÓN DE LA NMX-AA-014-1980", Comisión Nacional del Agua, México, 2004.
- [13] Applisens, *pH Sensor Manual*, México.
- [14] Applisens, *DO Sensor Manual*, México.
- [15] Microchip, *LM35DT Datasheet*, México.
- [16] Digi®, "Configuración de módulos XBee, X-CTU", <http://www.digi.com/support>.
- [17] DigiESP™, "Programación de gestión de red", <http://www.digi.com/support>.
- [18] G. Winch, *Telecommunication transmission Systems*, McGraw-Hill, segunda edición, 1998.
- [19] Wireless Hart®, www.hartcomm.org/protocol/wihart/wireless_technology.html