

UNIVERSIDAD DE SONORA DIVISIÓN DE INGENIERÍA



POSGRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL MAESTRÍA EN INGENIERÍA EN SISTEMAS Y TECNOLOGÍA

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DEL PH DEL
AGUA A TRAVÉS DE UNA RED DE SENSORES
INTELIGENTES

TESIS

PRESENTADA POR

CESAR EDUARDO HERNANDEZ CURIEL

Desarrollada para cumplir con uno de los
requerimientos parciales para obtener
el grado de Maestro en Ingeniería

DIRECTOR DE TESIS
VICTOR HUGO BENITEZ BALTAZAR

HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO.

NOVIEMBRE 2016

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess




Hermosillo, Sonora a 4 de noviembre de 2016

CESAR EDUARDO HERNANDEZ CUIEL

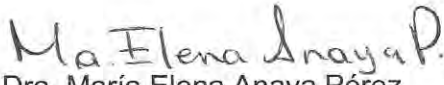
Con fundamento en el artículo 66, fracción III, del Reglamento de Estudios de Posgrado vigente, otorgamos a usted nuestra aprobación de la fase escrita del examen de grado, como requisito parcial para la obtención del Grado de Maestro en Ingeniería.

Por tal motivo este jurado extiende su autorización para que se proceda a la impresión final del documento de tesis: **DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DEL PH DEL AGUA A TRAVÉS DE UNA RED DE SENSORES INTELIGENTES** y posteriormente efectuar la fase oral del examen de grado.


ATENTAMENTE



Dr. Victor Hugo Benítez Baltazar
Director de tesis y Presidente del jurado



Dra. María Elena Anaya Pérez
Secretaria



M.C. Jesus Horacio Pacheco Ramirez
Vocal del Jurado

c.c.p. Archivo

Navojoa Sonora a 4 de noviembre de 2016

CESAR EDUARDO HERNANDEZ CURIEL

Con fundamento en el artículo 66, fracción III, del Reglamento de Estudios de Posgrado de la Universidad de Sonora, otorgo a usted mi aprobación de la fase escrita del examen profesional, como requisito parcial para la obtención del Grado de Maestro en Ingeniería.

Por tal motivo, como sinodal externo y vocal del jurado, extiendo mi autorización para que se proceda a la impresión final del documento de tesis: **DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DEL PH DEL AGUA A TRAVÉS DE UNA RED DE SENSORES INTELIGENTES** y posteriormente efectuar la fase oral del examen de grado.

ATENTAMENTE



DR. JOEL RUIZ IBARRA
UNIVERSIDAD ESTATAL DE SONORA
Sinodal Externo y Vocal del Jurado

RESUMEN

Hoy en día existe una gran necesidad de detectar los cambios que ocurren a nuestro alrededor. Especialmente en el medio ambiente, donde ya sea a causa de la naturaleza o intervención humana, existen variables que contribuyen a dichos cambios. Un elemento fundamental del medio ambiente es el agua. La calidad de esta es relativa al uso que se le dará. Por ello, en varias situaciones es necesario llevar un monitoreo para asegurar la finalidad del uso que tendrá.

Esta investigación se enfoca en el desarrollo de un sistema prototipo de monitoreo de la calidad del agua a través de una red de sensores inteligentes. El objetivo del sistema es monitorear el pH y la temperatura del agua a través de dispositivos a distancia conectados a una red. Este sistema dará pie a una investigación mayor donde se incluirán más variables del monitoreo de la calidad del agua. Así mismo, varias metodologías relacionadas a la investigación fueron analizadas y aplicadas para llevar a cabo este proyecto.

La investigación es desarrollada por una empresa del sector industrial que se enfoca en el ramo de la metrología dimensional, química, eléctrica, entre otras. Debido a que el monitoreo actual se realiza de forma manual y con toma de muestras en sitio, los resultados toman un tiempo relativo al transporte y tratamiento que se requiere. Por ello, la empresa se encontró con la necesidad de mejorar su proceso de monitoreo de la calidad del agua. Con un sistema automatizado, la empresa también ha encontrado una oportunidad en el mercado para desarrollar una tecnología que le permitirá obtener ventajas competitivas en sus sistemas de monitoreo.

El prototipo se comprende de tres aspectos mayores: el desarrollo de un sistema de medición, el desarrollo de un sistema de comunicación y el desarrollo de una planta tratadora de datos. Cabe mencionar que el prototipo fue desarrollado con elementos de costo accesible como lo son los sensores, controladores y estructuras. Así mismo la implementación del software fue realizada con lenguajes de programación con

código libre. Los resultados obtenidos muestran un avance en la investigación y dan paso a un proyecto mayor para monitorear la calidad del agua con más variables.

El proyecto posee mucha oportunidad de mejora. Si bien se obtuvieron buenos resultados, esta investigación requiere una intervención mayor de las diversas áreas que lo componen. Áreas como la informática para el desarrollo del software, la electrónica y mecánica para el desarrollo del sistema de medición, la estadística para el análisis de datos y la hidrología para el estudio de la dinámica de los humedales a monitorear.

ABSTRACT

Today, there is a great need to detect the changes taking place around us. Especially in the environment, where either by nature or human intervention, there are many variables that contribute to these changes. A key element of the environment is water. The quality of water is relative to the use that will be given. Therefore, in several situations, it is necessary to carry out a monitoring to ensure the purpose of the use that the water will have.

This research focuses on the development of a prototype system for monitoring water quality through a network of intelligent sensors. The purpose of the system is to monitor the pH and temperature of the water through remote devices connected to a network. This system will give rise to a larger investigation where more water quality variables will be included. Also, several methodologies related to this research were analyzed and applied to carry out this project.

The research is developed by an industrial sector company that focuses on dimensional, chemical, electrical metrology, among others. Due to the current monitoring being done manually and on site, the results take time relative to the transportation to the laboratory and treatment that is required. Therefore, the company was faced with the need to improve its process of monitoring water quality. With an automated system, the company has also found an opportunity in the market to develop a technology that will allow it to obtain competitive advantages in its systems of monitoring.

The prototype is comprised of three major aspects: the development of a measurement system, the development of a communication system and the development of a data processing plant. It should be mentioned that the prototype was developed with elements of accessible cost such as sensors, controllers, and structures. Also, the implementation of the software was realized with open source programming languages.

The results show an advance on the research and give way to a larger project to monitor water quality with more variables.

The project has a lot of opportunity for improvement. Although good results were obtained, this research requires a greater intervention of the diverse areas that compose it. Areas such as computer science for software development, electronics and mechanics for the development of the measurement system, statistics for data analysis, and hydrology for the study of the dynamics of wetlands to monitor.

DEDICATORIA

A mi madre, que con su esfuerzo y dedicación, forjó las bases de los valores, el conocimiento y los logros que he obtenido.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente a mi madre, la responsable de mis logros. Mi orgullo e inspiración, que con sus palabras y su esfuerzo me han llevado a ser el hombre que soy ahora.

Al Dr. Víctor Hugo Benítez Baltazar, por su paciencia y apoyo en todos los aspectos técnicos del proyecto. Por su pasión en su profesión, la cual lleva a inspirar a muchos estudiantes como yo a seguir adelante creando e innovando ideas.

Al resto de mis colaboradores de tesis, por su apoyo en aspectos técnicos y documentales en el proyecto.

A los profesores de la maestría, cuya dedicación al programa tiene como resultado alumnos que se mantienen en busca de sus sueños.

A la empresa donde se realizó el proyecto. Sin su apoyo por proyectos innovadores esta idea nunca hubiera existido.

Al departamento del CSTI (Centro de Servicios de Tecnologías de Información) dirigido por Iván Chávez. El cual fue el apoyo de uno de los pilares de esta investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Programa de Fortalecimiento de la Calidad en Instituciones Educativas (PROFOCIE) por su apoyo económico.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Presentación	1
1.2. Planteamiento del problema.....	2
1.3. Objetivo general	3
1.4. Objetivos específicos	3
1.5. Hipótesis	3
1.6. Alcances y delimitaciones	3
1.7. Justificación.....	4
2. MARCO DE REFERENCIA	5
2.1 Definición de Monitoreo	5
2.2 Calidad del agua	5
2.2.1 Índices de la calidad del agua.....	8
2.2.2 Calidad del agua en México.....	10
2.3 Medición del pH y temperatura en la calidad del agua.....	12
2.3.1 Cuidado de los electrodos de pH.....	15
2.3.2 Medición de la temperatura	15
2.3.3 Sensor de Temperatura a prueba de agua DS18B20.....	16
2.4 Definición de Sensores Inteligentes	17
2.4.1 Sensor Inteligente Atlas Scientific pH	18
2.5 Redes Inalámbricas para el Monitoreo de la Calidad del Agua.....	19
2.5.1 Descripción del Protocolo ZigBEE	20
2.5.2 Aplicaciones de Monitoreo de la Calidad del Agua con ZigBee.....	21
2.6 Descripción y Características de Protocolos de Comunicación	23
2.6.1 Descripción del dispositivo UART	23
2.6.2 Descripción del protocolo I ² C.....	23
2.7 Resumen de estudios previos de medición de la calidad del agua	25
2.7.1 Optiqua EventLab	25
2.7.2 WaterWise	26

2.7.3 Estudios con enfoque en el monitoreo de la calidad del agua que se hayan realizado a nivel prototipo.....	28
3. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.....	33
3.1 Análisis de estudios previos o estudio del arte del proyecto	36
3.2 Etapa 1. Desarrollo de nodo	36
3.2.1 Análisis de norma mexicana para la medición del pH.....	37
3.2.2 Pruebas experimentales con sensores inteligentes	37
3.2.3 Desarrollo de un sistema de comunicación.	39
3.3 Etapa 2. Evaluación del sistema de medición del pH.....	39
3.3.1 Desarrollo de la planta receptora de datos	40
3.4 Etapa 3. Diseño de estructura.....	42
3.5 Etapa 4. Pruebas de confiabilidad del sistema	42
3.6 Estructuración de la documentación	43
4. IMPLEMENTACIÓN	44
4.1 Análisis de la norma de medición del pH	44
4.2 Desarrollo de un sistema con capacidad de medir el pH	45
4.2.1 Arquitectura y descripción de elementos del sistema	46
4.2.2 Funcionamiento de nodo	48
4.3 Evaluación del sistema de medición	52
4.3.1 Procedimiento de verificación de la variación del instrumento Atlas Scientific y microcontrolador Arduino.....	52
4.4 Desarrollo del sistema de comunicación.....	56
4.5 Desarrollo de la estructura del nodo	61
4.6 Desarrollo de la planta receptora de datos	65
5. RESULTADOS	72
6. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	87
6.1 CONCLUSIONES	87
6.2 RECOMENDACIONES	89
6.3 TRABAJOS A FUTURO	90
REFERENCIAS.....	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Configuración de un medidor de pH por electrodo.....	14
Figura 2.2 Sensor DS18B20 (Techmake, 2014).....	16
Figura 2.3 Arquitectura de un sensor inteligente (elaboración propia).	17
Figura 2.4 Circuito EZO pH (AtlasScientific b, 2015).....	18
Figura 2.5 Envío de comando al circuito (elaboración propia).....	19
Figura 2.6 Diagrama de red (Silicon Labs, 2014).	21
Figura 2.7 Ejemplo de aplicación del protocolo I2C (elaboración propia).....	24
Figura 3.1 Puntos generales presentados en las investigaciones previas.	33
Figura 3.2 Metodología de la investigación	35
Figura 3.3 Desarrollo de nodo	37
Figura 3.4 Evaluación del sistema de medición (elaboración propia).....	40
Figura 3.5 Desarrollo de planta tratadora (elaboración propia).	41
Figura 4.1 Puntos relacionados con la norma mexicana de medición del pH	45
Figura 4.2 Arquitectura del Sistema de medición (elaboración propia)	46
Figura 4.3 Esquemático de nodo (elaboración propia).....	49
Figura 4.4 Diagrama de proceso de programa del microcontrolador (elaboración propia).....	50
Figura 4.5 Estructura de montaje temporal	51
Figura 4.6 Procedimiento de cambio de sustancia.....	54
Figura 4.7 Resultados para solución de pH 4.....	55
Figura 4.8 Resultados para solución de pH 7.....	56
Figura 4.9 Resultados para solución de pH 10.....	56
Figura 4.10 Arquitectura del sistema de medición de la calidad del agua	57
Figura 4.11 Radio nodo y radio de estación base.	58
Figura 4.12 Software X-CTU (DIGI, 2015).	59
Figura 4.13 Prueba entre dispositivos Software X-CTU (DIGI, 2015).	60
Figura 4.14 Diagrama de elementos del nodo	61
Figura 4.15 Estructura para sistema de medición (elaboración propia).	62
Figura 4.16 Estructura propuesta para el sistema.....	63

Figura 4.18 Estructura propuesta para el sistema.....	66
Figura 4.19 Interfaz propuesta.	69
Figura 4.20 Prueba con mediciones.....	70
Figura 4.21 Gráfica con datos.	71
Figura 5.1 Pruebas realizadas.....	72
Figura 5.2 Rutina de medición.....	73
Figura 5.3 Localización de sitios medidos.	74
Figura 5.4 Grafica de resultados sitio 1.	75
Figura 5.5 Grafica de resultados sitio 2.	76
Figura 5.6 Grafica de resultados sitio 3.....	77
Figura 5.7 Fotografía de montaje en sitio.....	78
Figura 5.8 Diagrama de prueba.....	79
Figura 5.9 Grafica de medición de dBm.	81
Figura 5.10 Parámetros de configuración entre radios.....	81
Figura 5.11 Resultado de prueba a 10m.	82
Figura 5.12 Resultado de prueba a 50m.	83
Figura 5.13 Resultado de prueba a 100m.	83
Figura 5.14 Resultado de prueba a 150m.	84
Figura 5.15 Resultado de prueba a 200m.	84
Figura 5.16 Resultado de prueba a 50m.	86
Figura 6.1 Propuesta para un sistema en sitio.	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Resultados para la solución 4	54
Tabla 4.2 Resultados para la solución 7	55
Tabla 4.3 Resultados para la solución 10.....	55
Tabla 5.1 Resultados para el sitio 1.....	75
Tabla 5.2 Resultados para el sitio 2.	75
Tabla 5.3 Resultados para el sitio 3.	76
Tabla 5.4 Resultados de la prueba de rango.....	80

1. INTRODUCCIÓN

La necesidad de detectar los cambios que ocurren en el medio ambiente, ya sea de origen natural o por intervención humana, se ha incrementado drásticamente en los últimos 50 años (Sánchez, 2007). Cuando se estudia la calidad del agua, realmente se describe la condición en que ésta se encuentra, incluyendo las características químicas, físicas y biológicas usualmente con respecto al uso que se le dará; dependiendo de la finalidad que esta tendrá, los estándares de calidad varían. Una baja calidad del agua puede ser un riesgo tanto para la salud humana como para el ecosistema (FKNMS, 2011). El monitoreo efectivo de la calidad del agua es la clave para la protección ambiental, así como para la protección humana.

El monitoreo automático de la calidad del agua ha sido tradicionalmente complejo y costoso a diferencia del monitoreo manual. Sin embargo, gracias a los avances tecnológicos, la aplicación de tecnologías de sensores inteligentes ha tenido como resultado intervalos de mantenimiento reducidos de los sistemas de monitoreo, así como información en tiempo real para la detección de eventos.

Existen diversos parámetros que sirven como indicadores para realizar un análisis sobre el estado de algún cuerpo de agua determinado. Algunos parámetros son el pH, oxígeno disuelto, temperatura, turbiedad, conductividad entre otros. El comportamiento de dichos parámetros es de naturaleza compleja. Por ello, el análisis de los parámetros debe de realizarse de forma continua y con sistemas especializados para la detección tanto de eventos como de falsas alarmas.

1.1. Presentación

Una empresa que se desempeña en el ramo de la metrología tiene actualmente un sistema de medición de la calidad del agua basado en diversas pruebas de laboratorio, de distintas variables como lo son el pH, la demanda química de oxígeno, coliformes

fecales, sólidos totales suspendidos, entre otras. La forma actual de la medición es llevada a cabo solamente en laboratorio, con personal entrenado y conforme a muestras limitadas que se toman en los puntos de interés para, posteriormente, ser transportadas al laboratorio. Estas pruebas poseen un alto costo para el cliente debido a los estudios específicos que se realizan para cada variable. Si bien, con este procedimiento se puede determinar la calidad del agua en cualquier punto o puntos de interés, los resultados son relativos con respecto al tiempo que se midieron. Esto tiene por consecuencia la lenta detección de cambios repentinos de la calidad del agua en puntos problemáticos.

La empresa ha encontrado varios problemas al tratar de desarrollar un sistema de monitoreo y medición de la calidad del agua, uno de ellos es la comunicación entre puntos de medición. Normalmente un sistema de monitoreo se realiza a través de varios puntos de una red determinada, en cada uno de estos puntos es necesario realizar una medición. Realizarla de forma manual tiene como resultado un alto costo en equipamiento y mano de obra debido a que requiere el desarrollo de un plan de monitoreo con el personal entrenado y/o laboratorios especializados en cada zona de interés. Otro de estos problemas es el costo que tiene el implementar un sistema que se encuentre en el mercado.

1.2. Planteamiento del problema

Actualmente la empresa realiza el monitoreo de la calidad del agua mediante pruebas que se realizan de forma manual con personal entrenado, el cual, toma diversas muestras para después trasladarlas al laboratorio. El análisis de estas muestras toma un tiempo relativo al transporte y tratamiento que requieren.

La empresa ha detectado una oportunidad en el mercado para desarrollar tecnología de monitoreo de la calidad del agua de forma automática que le permita obtener ventajas competitivas a sus procesos de monitoreo.

1.3. Objetivo general

Desarrollar un sistema de medición del pH del agua en tiempo real con elementos de bajo costo y en condiciones de laboratorio, que se comunique a través de una red inteligente de sensores.

1.4. Objetivos específicos

- Desarrollar un sistema de comunicación inalámbrica basada en el protocolo IEEE 802.15.4 (LR-WPAN).
- Desarrollar una estación receptora de datos.
- Desarrollar un sistema con capacidad de medir el pH del agua en condiciones de laboratorio.
- Realizar pruebas de laboratorio evaluando la confiabilidad de la recepción de datos.

1.5. Hipótesis

Mediante el desarrollo de un sistema de medición prototipo, la empresa tendrá la capacidad de monitorear el pH del agua en tiempo real a través de una red de sensores inalámbricos.

1.6. Alcances y delimitaciones

El proyecto se enfocará en sólo la medición del pH. El prototipo se realizará en condiciones de laboratorio. Esto implica que se enfocará en la medición a condiciones controladas, como por ejemplo la humedad, polvo, iluminación, vibración y ruido, entre otras.

El proyecto buscará realizarse con elementos de bajo costo, como lo es la plataforma de monitoreo, sensores, etc., pero a su vez se buscara encontrar la mejor confiabilidad de este.

1.7. Justificación

Para asegurar el buen suministro y distribución del agua potable, la calidad del agua necesita ser monitoreada en tiempo real. Las consecuencias de un monitoreo inadecuado pueden resultar en daños a la salud sustanciales así como daños económicos y ambientales (Lee et al., 2012).

La necesidad de la empresa por mejorar uno de sus procesos requiere la implementación de un sistema inteligente que mida el índice de pH del agua en tiempo real a través de una red de sensores inteligentes. Este sistema será parte de un proyecto futuro en el que se incluirán más variables que intervienen en el Índice de Calidad del Agua (ICA).

El uso de elementos de bajo costo como lo son sensores de pH y micro controladores de código abierto fáciles de usar, contribuirá para que en el mediano plazo, la empresa pueda realizar el proyecto de monitoreo del ICA con una buena elección de elementos robustos para su sistema.

La realización de este proyecto tendrá como beneficio principal un aumento en la eficiencia de la prueba de pH que se realizará en la empresa.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1 Definición de Monitoreo

El monitoreo se refiere a las observaciones sistemáticas de parámetros relacionados con un problema específico, diseñadas de tal manera que provean información sobre las características del problema a tratar y sus cambios a lo largo del tiempo (Spellerberg, 2005). Otra definición de monitoreo se describe en Shear (2006), la cual se plantea como una colección, análisis e interpretación rutinaria de datos físicos, químicos y biológicos en un sitio definido, a lo largo de un periodo dado y con una frecuencia de muestreo establecida.

La ISO (organización internacional para la estandarización) define al monitoreo como: “el proceso programado de muestreo, medición y registro subsecuente o señalamiento, o ambos, de varias características del agua, normalmente con la finalidad de evaluar la conformidad de objetivos específicos” (Bartram y Ballance, 1996).

El monitoreo debe de tener un plan previo organizado y bien estructurado. El plan se puede definir como el proceso de identificar las metas, desarrollar estrategias y fijar objetivos específicos (UNDP, 2009). Las metas son típicamente amplias y estratégicas, mientras que los objetivos son más específicos y cuantificables (Roni y Quimby, 2005). Así mismo, una vez definiendo los objetivos del monitoreo, estos necesitan ser transformados y mejorados en preguntas claves del monitoreo e hipótesis. Las preguntas e hipótesis diferirán entre proyectos y dependerán de los objetivos totales del proyecto así como del programa de monitoreo.

2.2 Calidad del agua

El agua es ciertamente, entre todos los elementos, esencial para la vida humana. Varios estudios están de acuerdo que es indispensable para el desarrollo económico (Ntouda et al, 2014). La mejora del acceso al agua potable segura resulta en beneficios para la salud. Cualquier esfuerzo requerido debe realizarse para lograr que el agua

sea tan segura como usable. Así mismo la decisión de seguridad es un tema en el cual la sociedad juega un rol importante (WHO, 2011).

Sin una buena cantidad y calidad de agua dulce no sería posible un desarrollo sustentable. La contaminación y desperdicio del agua dulce son amenazas al desarrollo de proyectos y hacen que el tratamiento del agua sea esencial para producir agua potable segura. En el caso de ecosistemas acuáticos las algas son vitales, debido a que son un componente biológico importante para evaluar la calidad del agua (Brunn, 2012). Los requerimientos u objetivos de la calidad del agua pueden ser determinados solamente en términos de sustentabilidad para un propósito o propósitos, o en relación al control de impactos definidos en la calidad del agua (Bartram y Ballance, 1996).

“Calidad del agua” es un término utilizado para expresar la finalidad del agua que sustentará varios usos o procesos (Asadollahfardi, 2014). Cualquier uso particular tendrá ciertos requerimientos para las características físicas, químicas o biológicas del agua; por ejemplo los límites en la concentración de sustancias tóxicas para el uso de agua potable, o las restricciones de rangos de temperatura y pH del agua que tienen comunidades de invertebrados (Bartram y Ballance, 1996).

La presencia de contaminantes y las características del agua son indicadores de la calidad. Estos indicadores pueden ser categorizados como físicos (temperatura, turbiedad, color), químicos (pH, oxígeno disuelto, demanda química de oxígeno) organolépticos (olores, color, materia flotante) y radioactivos (rayos alfa beta y gama) como se dice en Postolache et al. (2000). A partir de estas concentraciones se puede formar una lista de indicadores. Esta lista será tan larga como la cantidad de constituyentes se desee incluir. Si la lista contiene cientos de variables, será de poca usabilidad para un público que no esté familiarizado (Abbasi y Abbasi, 2012).

Tradicionalmente, la principal razón para monitorear la calidad del agua ha sido la necesidad de verificar su uso designado (WMO, 2013). Cuando los contaminantes químicos salen de los límites máximos o mínimos de sus concentraciones permitidas, el agua puede que no sea capaz de soportar los usos benéficos como la pesca, el

nado y hasta la ingestión. Estos usos designados y sus criterios específicos que los protegen forman estándares de calidad. Los profesionales evalúan la calidad del agua comparando las concentraciones de contaminantes químicos hallados en corrientes, con los criterios en los estándares del lugar, esto con la finalidad de juzgar si las corrientes de agua cumplen con sus usos designados (EPA, 2015).

Otro de los propósitos es el de identificar contaminantes y sus fuentes de contaminación. El monitoreo de la calidad del agua ayuda a relacionar las fuentes de contaminación con un problema de calidad, ya que identifica los contaminantes específicos. Debido a que ciertas actividades tienden a generar contaminantes (por ejemplo las bacterias y nutrientes es más probable que vengan de animales que de algún taller automotriz), un vínculo tentativo entre problemas y fuentes, puede ser propuesto para autorizar una investigación o monitoreo adicional. Así mismo, el monitoreo del agua sirve para determinar tendencias (WMO, 2013). Los componentes químicos que son propiamente monitoreados (como por ejemplo en tiempo constante usando métodos consistentes) pueden ser analizados para ver tendencias a través del tiempo. Por último, el monitoreo puede ser usado para detectar el deterioro. Encontrar niveles excesivos de uno o más constituyentes químicos puede servir como una advertencia temprana de problemas de contaminación potenciales (EPA, 2015). La Organización Mundial de la Salud o OMS (WHO, 2014) define al agua potable como la que es utilizada para fines domésticos e higiene personal, así como para beber y cocinar. Se tiene acceso a esta, si la fuente de la misma se encuentra a menos de un kilómetro de distancia del lugar de utilización y si uno puede obtener de manera fiable al menos 20 litros para cada miembro familiar. El acceso al agua potable seguro y el mayor acceso a los servicios de saneamiento son los principales retos de la calidad del agua para un mundo en desarrollo (Pechan y de Vries, 2013).

Al mismo tiempo la OMS desarrolló un marco donde se incluyen los requerimientos esenciales para asegurar la calidad del agua. El marco se constituye de objetivos basados en la salud establecidos por una autoridad competente así como sistemas adecuados y propiamente administrados (infraestructura adecuada, un monitoreo

apropiado y una administración efectiva) y un sistema de vigilancia independiente (WHO, 2011). El marco describe varias cuestiones del agua como lo son aspectos microbianos, químicos y radiológicos y la desinfección.

En términos generales los grandes riesgos microbianos están asociados con la ingestión del agua que se encuentra contaminada con heces humanas o animales incluyendo aves. Las heces pueden ser la fuente de bacterias patógenas, virus, protozoos y helmintos (Domingo y Ashbolt, 2012). De todos los contaminantes en el agua potable, las heces humanas o de animales presentan el mayor peligro para la salud. Esta contaminación puede crear un malestar gastrointestinal o diarrea (SME, 2012). Las preocupaciones asociadas con los constituyentes químicos del agua potable difieren con aquellos que están relacionados con la contaminación microbiana. Según la OMS existen varios químicos que pueden presentarse en el agua potable; sin embargo, solamente pocos son de preocupación inmediata para la salud en cualquier circunstancia. Así mismo, existen pocos químicos en la cual la contribución del agua potable hacia la ingestión general es un factor importante en la prevención de enfermedades. Por otro lado, la desinfección es y siempre ha sido de alta importancia en el suministro de agua potable (McGuire, 2013). La destrucción de microorganismos patógenos es esencial e implica comúnmente el uso de químicos reactivos como el cloro (WHO, 2011).

Otro de los aspectos principales para la calidad del agua potable son los de aceptabilidad como el olor, el sabor y la apariencia (DEH, 2011). Estas características organolépticas usualmente no poseen un riesgo a la salud pero poseen un desagrado para los usuarios y a veces representan una primera aproximación para cuestionar la calidad del agua.

2.2.1 Índices de la calidad del agua

Otro de los objetivos del monitoreo de la calidad del agua es crear índices compuestos (WMO, 2013). Los índices de calidad se enfocan en dar un valor comprensible a la calidad del agua de una fuente. Este valor proviene de una lista de constituyentes y

sus concentraciones que están presentes en el muestreo. Es posible comparar diferentes muestras para la calidad en base al valor de cada una de ellas. Este concepto de usar un índice para representar en un valor sencillo distintas variables, no es una idea nueva ya que ha sido muy usada en el comercio y la economía. Varios países Europeos han desarrollado y aplicado diferentes sistemas para clasificar la calidad de las aguas en sus respectivas regiones. Estos sistemas normalmente son de dos tipos (Abbasi y Abbasi, 2012):

1. Aquellos que se enfocan en la cantidad de contaminante que está presente.
2. Aquellos que se enfocan en organismos macroscópicos y microscópicos.

Uno de los primeros índices de calidad fue desarrollado por Horton (como es citado en Abbasi y Abbasi, 2012). Este índice de calidad comprende los criterios de la cantidad de variables que serán usadas, las cuales deben de ser limitadas. Así mismo las variables deberán poseer significancia para la mayoría de las áreas. Solo las variables donde los datos estén disponibles o puedan ser obtenidos, deberán estar incluidas. Horton seleccionó las variables más comunes que se medían, las cuales son oxígeno disuelto, pH, coliformes, conductividad, alcalinidad y cloro. Este índice no incluye ningún químico tóxico, y la calificación a cada variable va de 1 a 4. El índice se obtiene a través de una función de suma lineal. La función consiste en la suma ponderada de los subíndices I_i dividida entre la suma de las ponderaciones W_i y multiplicada por los coeficientes M_1 y M_2 , los cuales se refieren a la temperatura y la contaminación obvia respectivamente.

El índice de Horton es fácil de calcular aun cuando los coeficientes M_1 y M_2 requieren una adaptación a situaciones individuales. La estructura del índice, sus ponderaciones y su escala de calificación son altamente subjetivos ya que se basan en el juicio del autor y unos cuantos de sus asociados (Abbasi y Abbasi, 2012).

En un estudio aplicado (Ramakrishnaiah et al, 2008) se consideraron 12 parámetros para determinar el índice de la calidad de aguas subterráneas de Tumkur taluk. Los parámetros considerados fueron: pH, dureza total, calcio, magnesio, bicarbonato,

cloro, nitrato, sulfato, sólidos disueltos totales, hierro, manganeso y fluoruros. El índice de calidad de estos parámetros está en el rango de 89.21 a 660.56. Los parámetros fueron medidos conforme a los estándares de la India, así como los estándares de la OMS. El estudio concluyó que 63.5% de las muestras se encontraban en una calidad baja. Por lo tanto, el estudio reveló que el agua subterránea del área necesita un grado de tratamiento antes de su consumo.

2.2.2 Calidad del agua en México

La agricultura es el uso primordial del agua en México, principalmente para el riego de cultivos, más de un cuarto de la población económicamente activa de México trabaja en los sectores de agricultura, ganado y el sector forestal (ICID, 2015). La Comisión Nacional de Agua en México detalla que el área superficial para la producción agrícola era de 30.22 millones de hectáreas en 2007, de acuerdo con el VII Censo de agricultura, ganadería y bosque. El uso público del agua incluye toda el agua que es transmitida a través de las redes de distribución potables, las cuales suministran a usuarios domésticos así como a industrias. Por otro lado, en México también existe el uso industrial. El uso industrial del agua incluye aquellos propósitos como fabricación, procesamiento, lavado, enfriamiento o transportación de un producto (Manivasakam, 2011). Los requisitos de calidad para los usos industriales varían con el tipo de industria y el propósito que esta tendrá. No existe un tipo de agua universal que pueda ser usada para todos los usos.

De acuerdo con el Censo económico del 2004, los principales subsectores industriales, sin tomar en cuenta los enfocados a la producción de electricidad, son los del petróleo, extracción de gas, manufactura y transporte de equipo e industria química y alimenticia. Por último, se encuentra el agua usada en plantas termoeléctricas (CONAGUA, 2010).

En México se ha empleado por varios años el ICA, que agrupa de manera ponderada 18 parámetros fisicoquímicos (demanda bioquímica de oxígeno, oxígeno disuelto, coliformes fecales, coliformes totales, grasas y aceites, color, pH, entre otros). El ICA

indica el grado de contaminación del agua a la fecha de muestreo y esta expresado como un porcentaje de agua pura; por lo tanto, agua con alto grado de contaminación tendrá un ICA cercano o igual a 0%, en tanto que el agua en excelentes condiciones será cercano al 100% (SEMARNAT, 2005).

El ICA se desarrolló conforme a dos etapas: la primera consiste en crear una escala de clasificación de acuerdo a los diferentes usos que tendrá el agua. La segunda involucró el desarrollo de una escala de calificación de cada parámetro de tal forma que se estableciera una correlación entre los diferentes parámetros y su influencia en el grado de contaminación (SEMARNAT, 2005).

Pese a esto podemos observar que en México se han presentado diversos casos de contaminación del agua potable que han tenido consecuencias graves tanto en ecosistemas como en la salud humana. Un ejemplo de esto es la contaminación por organismos fecales en la laguna de Cajititlán (PROCESO, 2014), donde el Instituto Jalisciense de Ciencias Forenses concluyó la muerte de cuatro millones de toneladas de peces debido a que el agua contiene seis veces más el nivel máximo permitido de coliformes fecales. Otro caso fue la contaminación de pozos de agua por el derrame de sulfato de cobre (Cisneros, 2014), donde la contaminación afectó 17.6 kilómetros del arroyo Tinajas, 64 kilómetros del río Bacanuchi, y 190 kilómetros del río Sonora.

Arias et al (2015) llevaron a cabo un estudio de la calidad del agua en cinco pozos de cinco hogares seleccionados al azar en cuatro temporadas en el municipio de Ascensión Chihuahua México. Se determinó que alrededor de 80% de las muestras de agua dieron positivo para coliformes totales y coliformes fecales. Así mismo el pH y la temperatura fueron diferentes conforme a las estaciones de muestreo. El pH supero los valores establecidos por la norma mexicana e internacional. El estudio concluyó que el agua potable está contaminada desde el punto de vista microbiológico.

En otro estudio por Rubio-Arias et al (2013) se llevó a cabo un índice de calidad para un ecosistema acuático artificial en México. Se consideraron los parámetros: pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, temperatura, turbiedad, solidos disueltos

totales, dureza total, y cloruros. Para un primer análisis se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA) para cada variable considerando un tratamiento factorial de 12 x 2 donde el factor A eran los meses con 12 niveles de muestreo (meses) y el factor B era la profundidad con 3 niveles (0.30m, 5m y 10m). En un segundo análisis estadístico el índice de calidad del agua (ICA) fue calculado para cada mes y solamente para el muestreo superficial de 0.30m. El valor resultante fue clasificado en 3 categorías; < 2.0 como agua en malas condiciones, de 2.0 a 2.5 como en buenas condiciones y >2.5 agua en excelentes condiciones. El estudio concluyó que la mayoría de los parámetros se incrementaban durante la estación de lluvias. Las variables de turbiedad y dureza total estaban arriba de sus límites permisibles de acuerdo a estándares mexicanos e internacionales. En las estaciones de otoño e invierno el ICA resultó excelente. Finalmente, el estudio indicó que el agua del ecosistema puede ser utilizada sin ningún problema para propósitos ecológicos así como pesca, agricultura y producción de ganado. Sin embargo, el monitoreo continuo y el empleo de metodologías con más variables es altamente recomendado.

2.3 Medición del pH y temperatura en la calidad del agua

Una de las variables de medición de la calidad del agua de alta importancia es el pH. Este está definido como el logaritmo negativo del ion de hidrógeno y su propósito es ser una medida del equilibrio de los ácidos y bases y en la mayoría de los casos es controlado por el sistema de equilibrio del dióxido de carbono-bicarbonato-carbonato. Un incremento en la concentración del dióxido de carbono tendrá como consecuencia un decremento en el pH y viceversa. La temperatura también afecta su valor. En agua pura, un decremento en pH de 0.45 ocurre cuando la temperatura es incrementada por 25°C. El pH de la mayoría del agua en algún humedal está en el rango de 6.5-8.5 (WHO, 2014).

El pH es de mayor importancia para determinar la corrosión del agua. En general, entre más bajo, mas es el nivel de corrosión. Sin embargo, es uno de varios factores que afectan la corrosión. Pese a que este no tiene un impacto directo en los consumidores

de agua, es una de las variables operacionales más importantes de la medición del agua. Es necesario tener una atención muy cuidadosa al control de pH en todas las etapas del tratamiento del agua para asegurar la satisfactoria desinfección de esta. Por lo tanto debe de ser controlado para minimizar la corrosión de las tuberías en los sistemas de transporte del agua hacia hogares. Una falla en la reducción de pH podría resultar en la contaminación del agua potable y tener efectos en su sabor, olor y apariencia (WHO, 2014).

Existen diversos métodos para la medición del pH. El más común es el uso de un electrodo de vidrio sensible a este, un electrodo de referencia y un medidor. También existen otros métodos como los son indicadores y colorímetros. Los indicadores son materiales diseñados específicamente para cambiar de color cuando estos son expuestos a distintos niveles de pH. El colorímetro es un dispositivo que utiliza un envase lleno con un determinado volumen de muestra, al cual se le agrega un reactivo. Al agregar el reactivo, la mezcla cambia de color, el cual después es comparado con una rueda de color o espectro estándar de color para interpolar el valor resultante (Hach, 2003).

Los electrodos de pH de vidrio normalmente constan de dos partes principales: El electrodo de medición y el electrodo de referencia (figura 2.1). El primero normalmente llamado electrodo de vidrio es también referido como la membrana o el electrodo activo. El segundo es llamado el electrodo estándar. Así como dos potenciales de una celda de batería son necesarios para completar un circuito, el sensor de pH también actúa bajo este principio. La expresión matemática es $E = E_m - E_r$; donde E_m es el potencial del electrodo que se encuentra midiendo y E_r es el electrodo de referencia. Este tipo de medición en mili volts se conoce como una medición potencio-métrica (Hach, 2010).

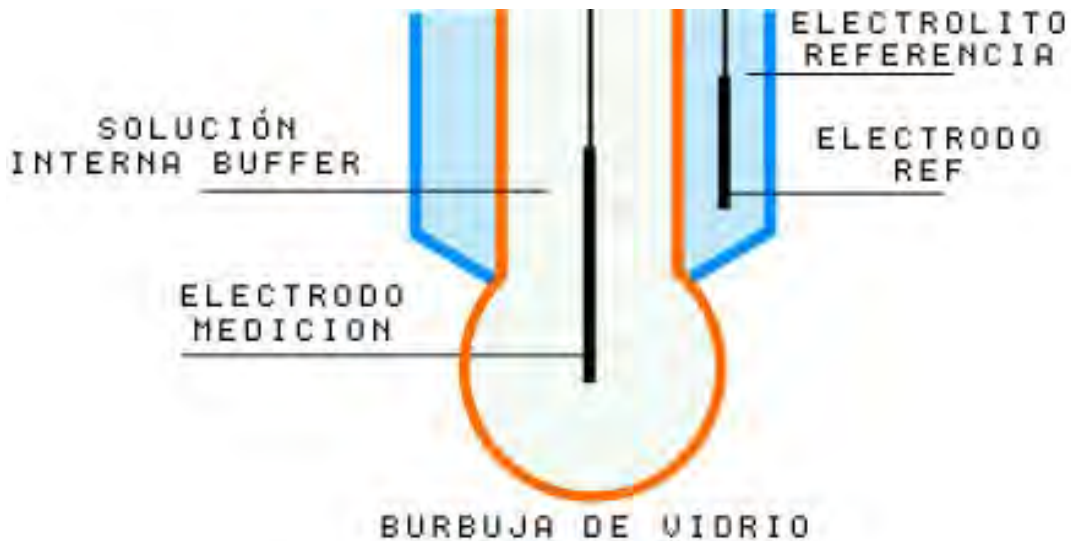


Figura 0.1 Configuración de un medidor de pH por electrodo.

La evaluación del método, en este caso la medición del pH es de alta importancia. Un método debe de validarse cuando sea necesario verificar que sus parámetros de desempeño son adecuados para el uso en un problema analítico específico. Por ejemplo:

- Un nuevo método desarrollado para un problema específico.
- Un método ya establecido revisado para incorporar mejoras o extenderlo a un nuevo problema.
- Cuando el control de calidad indica que un método ya establecido está cambiando con el tiempo.
- Un método establecido en un laboratorio diferente o con diferentes analistas o con diferente instrumentación.
- Para demostrar la equivalencia entre dos métodos, por ejemplo, entre un método nuevo y uno de referencia.

Posteriormente, se presentan estudios relacionados con la medición del pH y temperatura, con enfoque en monitoreo del agua a través de redes de sensores inalámbricas.

2.3.1 Cuidado de los electrodos de pH

Existen diversos factores que afectan al tiempo de vida de un electrodo de pH. Primero, la membrana se deshidratará si esta se deja fuera de la solución. Cuando esto pase, el sensor de pH tendrá una respuesta lenta y una impedancia alta cuando se vuelva a colocar en operación. La deshidratación constante reducirá la vida de servicio del electrodo. Una deshidratación prolongada tendrá como resultado la falla total de la membrana. El congelamiento, calor extremo, vibración e impacto mecánico deben de ser evitados al momento de transportar un electrodo. Siempre se debe de considerar el uso del empaque original cuando se traslada el electrodo de un lugar a otro (Hach, 2010).

El almacenamiento es otro de los factores principales (MRCLAB, 2013). Los electrodos de pH deben de ser almacenados en condiciones de 10 °C a 30 °C. Capas protectoras o soluciones de guardado deben de usarse para no dañar la membrana. Se recomienda guardar el electrodo ya sea en una solución de pH 4, agua destilada o agua potable. Bajo estas condiciones los electrodos pueden ser almacenados de 3 a 5 años (Hach, 2010).

2.3.2 Medición de la temperatura

La temperatura del agua es una propiedad física que expresa que tan caliente o fría se encuentra el agua (Merriam-Webster, 2015). O como dice Brown (citado en Kemker, 2014) la temperatura puede ser definida como la medición del promedio de la energía térmica de una sustancia. La energía térmica es energía cinética de átomos y moléculas. Esta energía puede ser transferida entre sustancias como el flujo de calor. La transferencia de calor, ya sea desde el aire, luz solar u otra fuente de agua o contaminación térmica, puede cambiar la temperatura (Kemker, 2014).

La temperatura es un parámetro importante para la calidad del agua (Postolache et al., 2000). Esta tiene influencia en la totalidad de la calidad de un cuerpo de agua. Temperaturas fuera de lo normal en humedales puede ocasionar un daño a los organismos que ahí viven. Según la agencia de protección ambiental (EPA b, 2015), los porcentajes de los procesos biológicos y químicos dependen de la temperatura. Los organismos acuáticos como microbios hasta peces son dependientes de ciertos rangos de temperatura para su salud óptima. Por ejemplo, Handeland et al. (2008) describe que la tasa de crecimiento, la ingesta de alimentos entre otros, del salmón del atlántico, son influenciadas por la temperatura y el tamaño de los peces.

2.3.3 Sensor de Temperatura a prueba de agua DS18B20

El sensor DS18B20 es un termómetro digital que proporciona mediciones de temperatura en Celsius de 9 a 12 bits. La versión del sensor resistente al agua se muestra en la figura 2.2 (Techmake, 2014). El sensor utiliza una interfaz de un cable (One Wire en inglés) para su comunicación, la cual por definición requiere solamente una línea de datos para la comunicación con un microprocesador central. El sensor tiene una temperatura operacional en el rango de -55°C a 125°C y tiene una precisión de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ sobre el rango de -10°C a 85°C .



Figura 0.2 Sensor DS18B20 (Techmake, 2014).

2.4 Definición de Sensores Inteligentes

Un sensor inteligente (figura 2.3) está definido como la combinación de un transductor con acondicionamiento de señal, algoritmos embebidos y una interfaz digital (Gervais, 2011). Otra definición de Makinwa (2014) nos dice que un sensor inteligente es aquel en la que un sensor y una interfaz electrónica dedicada están conectados entre sí. Puede consistir en un chip sencillo, como es el caso de sensores de imágenes y sensores de temperatura. Sin embargo, en casos donde el sensor no puede ser implementado en la misma tecnología que la interfaz, una solución de dos chips es requerida. Ejemplos de sensores de dos chips son sensores mecánicos como acelerómetros, giroscopios y micrófono.

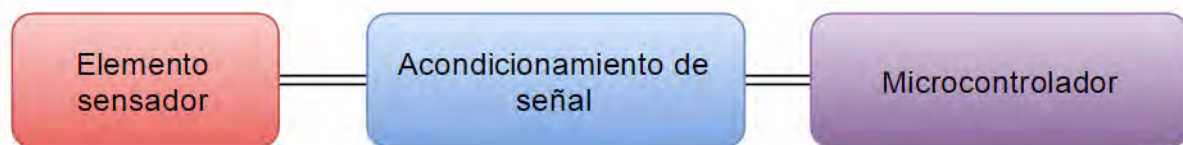


Figura 0.3 Arquitectura de un sensor inteligente (elaboración propia).

Los sensores inteligentes adquieren información de una cantidad no eléctrica de interés (el mesurando) y convierten esta información en una señal de salida útil. Los errores que se producen en los pasos de conversión y procesamiento afectan el desempeño y la confiabilidad de la totalidad del sistema. Por lo tanto, es de alta importancia determinar la magnitud de estos errores. A este proceso se le conoce como calibración (Pertijs, 2014).

Normalmente los sensores inteligentes requieren de un proceso de calibración. El vocabulario internacional de metrología (VIM, 2008) define a la calibración como la operación que, bajo condiciones específicas, la relación entre los valores de magnitudes indicados por un instrumento o sistema de medición o valores representados por una medida materializada o un material de referencia y los correspondientes valores aportados por patrones.

2.4.1 Sensor Inteligente Atlas Scientific pH

A diferencia de muchos sensores que proporcionan los datos de forma analógica, el circuito de pH tipo incrustado EZO de Atlas Scientific, ofrece el más alto nivel de estabilidad y precisión, dicho circuito se observa en la figura 2.4 (Atlas Scientific b, 2015). Con una configuración apropiada el circuito puede llegar o exceder la precisión y exactitud encontrada en la mayoría de los medidores de pH de laboratorio. El sensor posee la capacidad de lecturas de 0.001 hasta 14.000 en el rango de pH con una exactitud de ± 0.02 , lecturas dependientes o independientes de la temperatura, protocolos flexibles de calibración y modo de lectura sencilla o continua, posee capacidades de comunicación serial asíncrona UART y I2C (AtlasScientific, 2015).



Figura 0.4 Circuito EZO pH (AtlasScientific b, 2015).

El sensor tiene la capacidad de ser calibrado en dos o 3 puntos en el rango del pH. A través de un comando dirigido al circuito como se muestra en la Figura 2.5 (Atlas Scientific b, 2015). La calibración puede ser realizada en los puntos 0-6, 7 y 9-10. El procedimiento de calibración requiere que la calibración en el punto medio (7) será la que se lleve a cabo primero. Ya calibrado dicho punto, se procede a calibrar el circuito en los puntos bajos y altos seleccionados. El sensor incluye 3 sustancias para su calibración las cuales tienen los valores de 4, 7 y 10. Los comandos dirigidos al sensor tienen el formato ASCII y la siguiente estructura `Cal,mid,X.XX,<CR>`. Donde X.XX es cualquier punto flotante que representa el punto medio. En la mayoría de los casos debe de ser 7.00. Para el caso de los puntos bajo y alto solo se cambia la palabra “mid”

por “low” y “high”. Una vez enviado el comando el sistema envía la respuesta. Para borrar la calibración se utiliza el comando Cal,clear<CR> (Atlas Scientific, 2015).

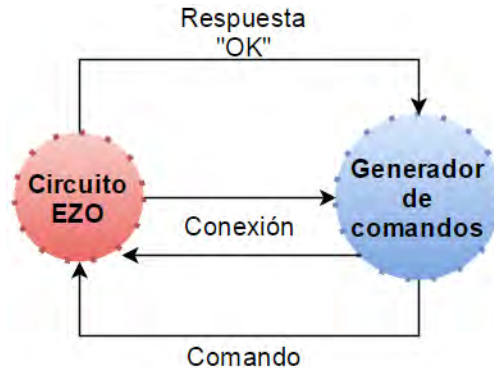


Figura 0.5 Envío de comando al circuito (elaboración propia).

2.5 Redes Inalámbricas para el Monitoreo de la Calidad del Agua.

Las redes de computadoras se han convertido en parte de nuestra vida diaria. Estas hacen de la información y los servicios disponibles para todos (Yang, 2014). A través de las redes, muchos sensores se interconectan localmente. Sin embargo, un número creciente de sensores está utilizando protocolos de comunicación inalámbrica. Esto es importante debido a que muchas aplicaciones de redes requieren cientos de sensores, usualmente desplegados en áreas poco accesibles. Por lo tanto, un sensor inalámbrico no solo censa una magnitud, sino que a su vez posee la capacidad de comunicar y almacenar datos. Cuando varios sensores cooperan para monitorear grandes ambientes físicos, estos forman una red de sensores inalámbricos. Los sensores no solo trabajan por si mismos, sino que también se comunican con una estación base, la comunicación es en base a protocolos que manejan diferentes estándares para la comunicación (Dargie y Poellabauer, 2010).

El IEEE 802.11 es la familia de estándares más conocida que fue introducida en 1997 y a su vez es el más usado en tecnologías inalámbricas para sistemas móviles. Sin embargo, el alto consumo de energía de las redes basadas en este, lo convierte en un

estándar no adecuado para sistemas inalámbricos de bajo consumo. Esto llevó al desarrollo de una variedad de protocolos que satisfacen de mejor manera estas necesidades. Por ejemplo, el protocolo IEEE 802.15.4 (Gutiérrez et al. 2001) fue diseñado específicamente para comunicaciones de corto alcance en redes de sensores de bajo consumo de energía. Este protocolo es soportado por la mayoría de nodos comerciales y académicos.

2.5.1 Descripción del Protocolo ZigBEE

El protocolo ZigBee está definido como una tecnología inalámbrica que fue desarrollada como un estándar global y abierto, con el fin de cubrir las necesidades de bajos costos y energía en redes tipo maquina a máquina. Este estándar opera en la especificación IEEE 802.15.4 y utiliza bandas sin licencia incluyendo 2.4 GHz, 900 MHz y 868 MHz. Algunas características del protocolo incluyen: soporte para múltiples topologías de redes como punto a punto, ciclos bajos de trabajo que proveen una larga vida de batería, baja latencia, hasta 65,000 nodos por red, entre otras (DIGI, 2015).

Uno de los componentes claves del protocolo ZigBee es la habilidad de soportar redes de malla (Yang, 2014). En estas redes los nodos están interconectados con otros nodos para formar caminos múltiples que se conectan entre sí. Las redes de malla son de naturaleza descentralizada; cada nodo es capaz de auto descubrirse. Además, cuando un nodo deja la red, la topología de malla permite a los nodos reconfigurar sus rutas basándose en una nueva estructura de red (DIGI, 2015). Esto provee estabilidad en condiciones cambiantes o fallos en nodos individuales. ZigBee posee tipos de nodos finales, nodos enrutadores y coordinadores como se muestra en la siguiente figura (Silicon Labs, 2014).

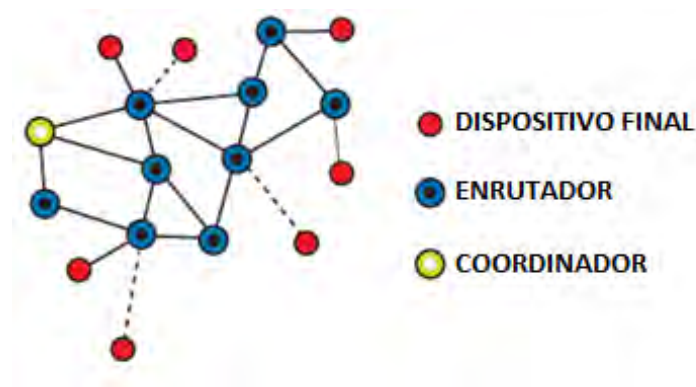


Figura 0.6 Diagrama de red (Silicon Labs, 2014).

El coordinador se encarga de formar la red, proveer direcciones y administrar otras funciones de la red. Por red existe solamente un coordinador. El enrutador es un nodo con todas las funciones de un dispositivo final. Puede unirse a nodos existentes, enviar y recibir información. Este también actúa como el mensajero entre dispositivos que están muy lejos para comunicarse por sí solos. Una red puede tener múltiples enrutadores.

Por último, el nodo final solamente puede unirse a la red, enviar y recibir información. Estos necesitan de un enrutador siempre. La mayor ventaja de estos dispositivos es que pueden entrar en modo de ahorro de energía en el momento de su utilización. Una red puede tener múltiples dispositivos finales.

2.5.2 Aplicaciones de Monitoreo de la Calidad del Agua con ZigBee.

En (Jiang et al. 2009) se realizó el monitoreo del agua por redes de sensores. Para la comunicación se utilizó el chip CC2420, el cual es un radio de clase industrial desarrollado por Chipcon. Con pocos componentes periféricos, este chip puede recibir y enviar datos confiables en la banda de 2.4GHz. Este chip es el encargado de transportar los datos los cuales vienen en una estructura donde la información es contenida.

La estructura está compuesta por el cuadro líder, el cuadro de longitud, el cuadro de control, número serial, información de dirección, datos transferidos, RSSI y CRC.

Cuando un paquete es recibido, el programa decide si el cuadro líder es el correcto, si este no lo es, es descartado. Si el cuadro inicial es correcto el programa entonces revisara su longitud. El programa también descartará si la longitud es incorrecta. Después de comprobar el cuadro inicial y la longitud, el programa decide si el RSSI y el CRC son correctos. Si todo es correcto, el programa entonces leerá los datos en el paquete y los convertirá para después transferirlos al módulo de procesamiento.

Menon et al. (2012) elaboraron una red de sensores para el monitoreo de la calidad del agua en un río, se utilizó un módulo de comunicación que utiliza el sistema MICAz de Crossbow Technology, el cual tiene un transceptor de RF. Opera en el standard de la IEEE 802.14.5 en la banda ISM 2.4GHz ofreciendo un flujo de datos de 250kbps usando el espectro expandido por secuencia directa. Los datos recibidos del microcontrolador son enviados a través del sistema de comunicación hacia la estación base para su análisis. Este sistema determina la condición del agua categorizándola dependiendo de sus mediciones como acida, bajo en acido, alto en acido, etc.

En *“solución basada en redes de sensores inalámbricos para el monitoreo ambiental”*: se realizó un estudio de caso evaluando la calidad del agua (Postolache et al., 2014), se utilizó el módulo WSN-3202 de National Instruments como parte de la red basada en Zigbee. El modulo puede ser configurado como enrutador o nodo final por medio del software NI MAX. Se consideró una antena de 15 dBi de alta ganancia que asegura una mejor cobertura y permite el incremento de la distancia entre el enrutador y la puerta de entrada.

En Sistema de calidad del agua basado en redes de sensores con ZigBee (Sridharan, 2014) se realizó un estudio del monitoreo de la calidad del agua basado en el protocolo ZigBee. El módulo de transmisión usa un transceptor que cumple con el estándar IEEE 802.15.4, este requiere una fuente de energía de 5VDC. Para el monitoreo y análisis de los datos provenientes de los sensores se utilizó una plataforma software con una interfaz gráfica desarrollada en MATLAB.

2.6 Descripción y Características de Protocolos de Comunicación

2.6.1 Descripción del dispositivo UART

El periférico receptor/transmisor universal asíncrono (UART por sus siglas en inglés) está basado en el estándar de la industria de comunicación asíncrona TL16C550, el cual es una actualización funcional del TL16C450. El protocolo realiza conversiones de serie a paralelo en los datos recibidos desde un dispositivo, y conversiones de paralelo a serie en datos recibidos del CPU. El CPU puede leer el estado del dispositivo en cualquier momento. El dispositivo incluye capacidades de control y un sistema interruptor del procesador que puede ser configurado para minimizar la administración de software en los enlaces de comunicación (Texas Instruments b, 2015).

2.6.2 Descripción del protocolo I²C

El bus I²C fue diseñado por Philips a principios de los años 80 con el objetivo de proveer una comunicación entre componentes electrónicos que se encuentran en un mismo circuito. La comunicación original fue definida con un máximo de 100 kbits por segundo (I²C bus, 2014). Algunas de las características del bus incluyen:

- Solo dos líneas son requeridas; una línea de datos seriales (SDA) y una línea serial de reloj (SCL).
- Cada dispositivo conectado al bus puede ser accesado a través de software con una dirección única.
- El número de circuitos integrados que pueden ser conectados al mismo bus esta solo limitada por la capacitancia máxima del bus de 400pF.
- La conexión es serial, orientada a 8 bits con una transferencia bidireccional con posibilidad de 100 kbit/s en el modo estándar y hasta 400 kbit/s en el modo veloz.

En la figura 2.7 se muestra un ejemplo de aplicación utilizando el bus de datos I²C.

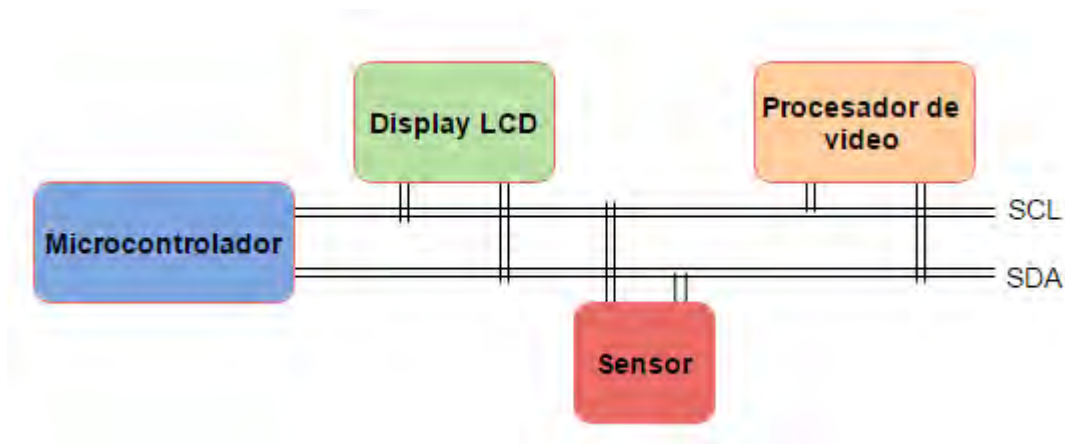


Figura 0.7 Ejemplo de aplicación del protocolo I²C (elaboración propia).

Los circuitos integrados compatibles con el protocolo de I²C permiten que el diseño del sistema progrese rápidamente de un diagrama de bloques a un prototipo. Así mismo, gracias a la sencilla conexión sin ninguna interfaz adicional, los cambios al sistema pueden realizarse de una forma sencilla (NXP, 2014). Por otro lado, desde el punto de vista de manufactura existen muchos beneficios. La principal viene siendo la interfaz sencilla de 2 cables minimiza la interconexión, por lo tanto los circuitos integrados tienen menos pines resultando en tableros más pequeños.

Rutka nos describe (como es citado Kirianaki et al., 2002) que desde un punto de vista de sensores inteligentes, el protocolo I²C es de alto interés. La topología es simple y posee requerimiento mínimo comparado a otros protocolos. Existen algunos ejemplos de sensores que utilizan este protocolo como lo es el MPL115A2; este es un barómetro digital que mide la presión absoluta con un enfoque a aplicaciones de bajo costo (Freescale Semiconductor, 2013).

Otro ejemplo es el sensor de temperatura TMP101, tiene la capacidad de medir la temperatura con una precisión de +/- 1 C. Las aplicaciones de este sensor son diversas como monitoreo de temperatura de fuentes de energía, celulares, gestión de baterías, control de termostatos, entre otros (Texas Instruments, 2015).

2.7 Resumen de estudios previos de medición de la calidad del agua

Dos estudios que fueron desarrollados y aplicados a redes de distribución del agua se presentan a continuación. Debido a que el proyecto es parte de una investigación mayor donde se desea desarrollar un sistema de monitoreo de la calidad del agua aplicable a redes de distribución y humedales, se decidió incluir estas investigaciones.

2.7.1 Optiqua EventLab

En (Williamson et al., 2012) se diseñó una red de sensores que se pueden localizar en la fuente, nodos principales, altos consumidores y consumidores residenciales. El sistema fue probado en un área dedicada proporcionada por la empresa Vitens con el nombre de campo de juegos de innovación de Vitens. Este campo está equipado para la evaluación de nuevas tecnologías en sensores de la calidad del agua así como tecnologías de la información. El campo está localizado al norte de los Países Bajos en la provincia de Firesland. El lugar consiste en áreas tanto rurales como urbanas y esta suministrado por tres plantas de tratamiento del agua. La red de distribución en el campo puede ser suministrada por una sola fuente de agua o por una mezcla de las tres fuentes que suministran al área.

Por medio de un sistema desarrollado por la empresa de Optiqua llamado EventLab, se realizó una red de monitoreo capaz de detectar anomalías en la calidad del agua en sus redes de distribución. Donde en el pasado era imposible detectar y seguir problemas en tiempo real. EventLab es un sensor óptico genérico que mide el índice de refracción de cambio por minuto en el agua, usando el principio de interferometría de Mach Zehnder (Williamson et al., 2012). El índice de refracción (IR) es un indicador genérico útil para la calidad del agua debido a que, cualquier sustancia que es disuelta en el agua, tendrá un cambio en su IR en la matriz del agua. El sensor opera a un nivel de sensibilidad de 10^{-7} en el IR el cual permite la detección de varias

substancias toxicas a un nivel donde el consumo de agua a 24 horas no causa un riesgo aplicable a la salud.

Así mismo se desarrolló un sistema de almacenamiento central y análisis de los datos llamado EventLab Online. Los datos son enviados a través de una conexión GPRS. Estos datos son pre procesados a través de etapas de verificación y compensación antes de ser de enviados a la detección de eventos. En la detección, los cambios en la composición del agua son detectados a través de algoritmos múltiples usados, cada uno enfocado a un distinto tipo de dinámica de la calidad del agua. La base de la detección de eventos es establecer una configuración usando datos históricos. Durante este entrenamiento el sistema aprende a tratar con la dinámica natural de la calidad del agua (Williamson et al., 2012).

En esta investigación, se desplegaron un total de 44 sensores de EventLab distribuidos en la red. De igual forma se determinó que estos sensores, así como su plataforma online, son adecuados para detectar cambios en la calidad del agua. Uno de los grandes retos de los sensores en operación, es separar las variaciones operacionales y naturales de la calidad del agua en eventos no ordinarios. Esto requiere establecer condiciones base en los diversos sitios de medición.

El proyecto tuvo como resultado la detección de dos eventos en la red de distribución. El primero fue la detección de la ruptura de una de las tuberías mayores. El sistema de EventLab reveló la ruptura y suministró una indicación general del sitio de la fuga, usando la secuencia en la cual los sensores individuales respondieron. Otro evento fue la detección debido al mantenimiento de la planta de tratamiento del agua (Williamson et al., 2012).

2.7.2 WaterWise

Por otra parte en (Whittle et al., 2013) se realizó un sistema hardware integrado con una plataforma de software combinando una red de sensores en tiempo real con análisis inteligente y herramientas de modelado para ayudar al sistema de distribución

en su operación y manejo. El sistema se construyó alrededor de una red de sensores inalámbricos que miden tanto parámetros hidráulicos como de la calidad del agua dentro de una red grande de distribución en Singapur. El sistema llamado WaterWise de monitoreo provee datos críticos que pueden permitir la optimización de los costos de bombeo (al mantener presiones y calidad del agua).

La plataforma está compuesta por una red online de sensores inalámbricos (la cual proporciona los datos), un sistema de alertas electrónicas y datos integrados (donde se procesan los datos de la red para detectar y localizar eventos anormales), así como un módulo de herramientas de soporte de decisión (con el que se posee un modelo hidráulico calibrado de la red de distribución del agua). Cada nodo sensor posee un procesador, un módulo GPS para sincronización de tiempo y un modem 3G para la transmisión de datos. Los sensores poseen una tarjeta personalizada con entradas y salidas que soportan parámetros hidráulicos (presión, hidroponía, flujo) así como parámetros de la calidad del agua (pH, conductividad, temperatura, potencial de reducción de oxidación como sustituto de cloro libre y conductividad eléctrica). Los nodos pueden ser configurados dinámicamente y remotamente para el censar y transmitir datos en una variedad de formas. Los datos de hidroponía son usados para detectar fugas. Los datos de la presión son indicadores de rompimiento de tuberías (Whittle et al., 2013).

El sistema de alertas es el responsable por la administración del flujo de datos, procesamiento y alertas. Este sistema tiene un conjunto de analíticos que son aplicados al flujo de datos con la finalidad de detectar eventos anormales y proveer estimados de localización. Cuando un evento anormal es detectado, una alerta se activa y es enviada por medio de correo electrónico o sistema de mensajería instantánea a usuarios suscritos de WaterWise. El módulo de herramientas para el soporte de decisiones usa los datos de los sensores que provienen del sistema de alerta como entradas para el módulo, las cuales modelan la red de agua como un conjunto de zonas de demanda (Whittle et al., 2013).

El sistema WaterWise tiene la capacidad para detectar y localizar transitorios de presión asociados con roturas, fugas u operaciones de válvulas. A través de un algoritmo de localización basado en gráficas, el sistema incorpora los tiempos de llegada de las detecciones transitorias en los nodos sensores, esto con la finalidad de localizar el evento. Este sistema de monitoreo provee datos críticos dentro de la red de distribución, los cuales permiten la optimización de costos de bombeo. A través de una investigación continua, el proyecto tiene como objetivo, el desarrollar una comprensión más fiable para la detección de anomalías en la calidad del agua (Whittle et al., 2013).

2.7.3 Estudios con enfoque en el monitoreo de la calidad del agua que se hayan realizado a nivel prototipo.

En *“diseño de un sistema de monitoreo ambiental del agua basada en redes de sensores”* (Jiang et al. 2009) se realizó el diseño de un sistema de monitoreo ambiental del agua basado en redes de sensores inalámbricas. El sistema se compone de tres partes: nodos de monitoreo de datos, estación de base de datos y un centro de monitoreo remoto. Los nodos recolectan parámetros del pH y temperatura. Así mismo el sistema es capaz de aplicar la linealización y la compensación de la temperatura, empaquetamiento de datos, memorización de los datos recolectados y el enrutamiento a la estación base; estos datos entonces son transferidos a un centro remoto de monitoreo a través de una red de GPRS. El centro de monitoreo analiza y procesa los datos de la calidad del agua y genera alarmas para emergencias como contaminación del agua o cambios repentinos en la calidad de ésta. El sistema presenta características útiles como gran capacidad de red, disposición flexible, bajo consumo de poder y costo, así como un efecto menor en el ambiente.

Los nodos se componen de un módulo de procesamiento, transmisor de pH, módulo de sensado, módulo de energía y el módulo de radio con frecuencia Zigbee. Con excepción del módulo de sensado, todos se encuentran en una estructura a prueba de agua que flota en la superficie con un ancla (Jiang et al. 2009).

El sistema hardware está basado en el procesador MSP430F1611 para el control tanto del nodo como de la estación base. El circuito nodo se comunica con el dispositivo CC2420 el cual es un módulo Zigbee. El módulo de energía se compone de una batería, un circuito aislador de energía y un regulador de voltaje que suministra energía al módulo de control y al radio (Jiang et al. 2009).

El software para el nodo se desarrolló a través del ambiente de desarrollo IAR Embedded Workbench con el lenguaje de programación C. El software se puede dividir en dos módulos. El primero es el programa de procesamiento principal, el cual procesa los parámetros del agua en el ambiente que son recolectados por los sensores. El segundo módulo es la comunicación con el radio Zigbee, el cual recibe y envía los parámetros provenientes de los sensores. El sistema se probó en un monitoreo de la temperatura y el pH de un lago artificial. La capacidad del sistema posee un rango de 0 a 80 °C de temperatura con una exactitud de ± 0.5 °C y un rango de 0 a 14 en la escala de pH con una exactitud de ± 0.05 (Jiang et al. 2009).

Por otro lado, en contraste con el estudio anterior, los elementos usados para el monitoreo de la calidad del agua desarrollados por Faustine et al (2014) poseen un costo más accesible. En este estudio se desarrolló un sistema de monitoreo de la calidad del agua a nivel prototipo, que monitorea parámetros como pH, temperatura, oxígeno disuelto, y conductividad eléctrica, El monitoreo de estos sensores se lleva a cabo en tiempo real, la información es trasladada a un portal web y aplicaciones móviles. El sistema consiste de un microcontrolador Arduino, sensores de la calidad del agua y un módulo de conexión inalámbrico (Faustine et al. 2014).

El nodo está compuesto por sensores, la unidad de microcontrolador, sistema de posicionamiento global GPS, una fuente de poder y un transmisor de radio frecuencia. Los sensores que intervienen son los sensores mencionados anteriormente, sin embargo, existe la posibilidad de agregar más sensores al sistema dependiendo de las necesidades. El nodo de red de sensor inalámbrico es de los más importantes y únicos en el sistema. Éste recolecta toda la información recibida de los sensores. Está

integrada por un módulo GPRS, un transceptor RF, tarjeta de memoria y suministro de energía. El GPRS actúa como comunicador de la red celular para enviar los datos en forma de SMS al sistema web. El software está compuesto por un sistema llamado WaGoSy, el cual es una base de datos usada para almacenar los datos, así como visualizar la información gráficamente. El software se desarrolló usando MySQL, PHP, HTML y Java Scripts (Faustine et al. 2014).

El sistema demostró ser de bajo costo y con la capacidad de monitoreo continuo usando redes de sensores inalámbricas. Con el uso de portales basados en web y aplicaciones móviles, los valores de los parámetros medidos son visualizados en formatos fáciles de comprender en cualquier momento y cualquier lugar (Faustine et al. 2014).

Menon et al. (2012) desarrollaron una red de sensores inalámbricos para el monitoreo de la calidad del agua de un río en India. El nodo sensor está diseñado para el monitoreo del pH del agua, el cual es uno de los parámetros que afectan a la calidad como se menciona anteriormente. La arquitectura propuesta se basa en el monitoreo de cuatro áreas generales: cerca de la casa de bombeo de agua, cerca de una industria o fábrica, cerca de una granja o sitio de agricultura y cerca de un área residencial.

Este nodo sensor está compuesto por un sensor de pH, un circuito de acondicionamiento de la señal, módulo de comunicación basado en el protocolo Zigbee y un módulo de energía. El sensor de pH posee una salida en mV por lo tanto la señal necesita ser acondicionada o amplificada antes de pasar al microcontrolador. Para ello, el acondicionamiento de señal consiste de un circuito usando el amplificador operacional TL082. La señal amplificada estará en el rango de -2v a +2v. Debido a que el microcontrolador no aceptara una señal negativa, el circuito también posee un circuito sumador para que la señal sea ajustada a un rango de 0.2v a 4.2v. Existe una probabilidad de que fuentes externas produzcan ruido al sistema, por lo tanto se agregó un filtro con la topología de Sallen-key (Menon et al. 2012).

Para el módulo de procesamiento se utilizó un microcontrolador PIC17F877 debido a su bajo costo, tamaño compacto y bajo consumo de energía. A través de este, se realiza la conversión analógica digital de la señal para después ser transferida por medio de la interfaz serial al módulo de comunicación. Finalmente se realizó una simulación para el proyecto a través del software Proteus y se hicieron pruebas con el circuito prototipo. Mediante el software Hyper terminal se identificaron los datos provenientes del sensor. El sistema se piensa integrar con otros sensores de la calidad del agua como lo son, temperatura, conductividad, oxígeno disuelto etc. Cuando se integren estas variables, el sistema tendrá la capacidad de monitorear la contaminación del agua en un área. Así mismo, los métodos para optimizar el desempeño y la confiabilidad del sistema, se incluirán en trabajos futuros (Menon et al. 2012).

En “sistema de redes de sensores para el monitoreo de una granja de sensores” (Sutar y Patil, 2013) fue desarrollada una aplicación práctica para redes de sensores la cual se compone de dos módulos; el módulo sensor y el módulo de comunicación inalámbrica. El modulo sensor recolecta y transmite la información al módulo inalámbrico a través de una conexión cableada. El objetivo de esta aplicación es monitorear el pH y temperatura de una granja de pescados.

La arquitectura del sistema se compone de un transmisor y un receptor. El primero está compuesto por el microcontrolador, los sensores y el transceptor con protocolo Zigbee. El Modulo receptor está compuesto por un transceptor Zigbee y un circuito que realiza la interfaz con un computador. Para el microcontrolador fue utilizado un LPC2148 que está basado en el procesador ARM7TDMI-S. Para el sensor de pH se realizó un circuito amplificador utilizando el LM4140A-1 que genera un voltaje de referencia (Sutar y Patil, 2013).

El prototipo fue diseñado y los sensores se instalaron en la granja de pescado. Se consideró un rango de 5 a 9 en la escala del pH y de 30°C a 45 °C en temperatura. Se establecieron límites superiores donde si ocurre un cambio en los parámetros, un

indicador se activa. La estación base consiste de un módulo Zigbee como se mencionó anteriormente. Los datos recibidos del sensor son transportados a un computador usando el protocolo RS-232 donde una interfaz realizada en el software LabView de National Instruments transfiere los datos a un entorno gráfico. Se concluyó que el sistema transmite los parámetros con su exacta precisión a la estación donde un administrador realiza el monitoreo. El sistema fue diseñado e implementado y tiene las ventajas de bajo consumo de energía y una mayor flexibilidad de desplegarse (Sutar y Patil, 2013).

3. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

En este capítulo se describe la metodología para el sistema de monitoreo inalámbrico propuesto. Debido a los objetivos planteados en esta investigación, la metodología es de naturaleza experimental. Según Babbie (2010) el término experimento tiene dos definiciones, una particular y una general. La general se refiere a realizar una acción y después observar las consecuencias. La definición particular, se refiere al estudio donde se manipulan intencionalmente una o más variables independientes, para analizar las consecuencias que la manipulación tiene sobre o una o más variables dependientes, dentro de una situación de control para el investigador (Sampieri, 2010).

Conforme a los estudios previos analizados, la metodología tiene una gran similitud al diseño creado por los autores mencionados en el capítulo anterior. En general existen 4 pasos para la realización de proyectos de investigación los cuales se observan en la figura 3.1.

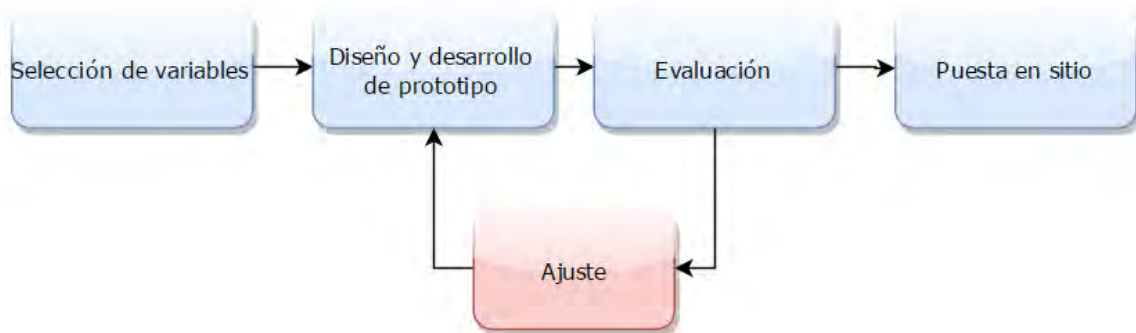


Figura 3.1 Puntos generales presentados en las investigaciones previas.

Primero, la toma de decisión de las variables a medir es la clave para los pasos siguientes. Para esto, se debe definir claramente cuál será el objetivo del prototipo, ¿Qué variables medirá? ¿El agua a medir tendrá un uso industrial o un uso doméstico?

Segundo, la selección de los elementos de hardware y software que mejor se adapten al objetivo. Dando prioridad al hardware, ya que es aquél que se encargará de

transformar las variables medidas a señales que puedan ser interpretadas por un computador. De igual manera, si se requiere un prototipo solamente o un sistema de monitoreo complejo que pueda predecir eventos.

Tercero, la elaboración del prototipo de medición y por último el análisis y prueba del prototipo en condiciones controladas. Si bien dos de los proyectos de investigación (Whittle et al., 2013) y (Williamson et al., 2012) se centran mucho en el análisis de los datos, la finalidad de esta investigación es la realización del prototipo que elimine la necesidad de monitorear el agua manualmente.

Por otro lado, la selección de variables para este proyecto fue definida en el capítulo uno. Las variables medidas serán el pH y la temperatura. Conforme a éstas, una rutina de muestreo sencilla debe de realizarse para la creación del prototipo. Esta rutina deberá ser configurada en el microcontrolador para llevar a cabo el muestreo al tiempo planeado.

En la figura 3.2 se muestra la metodología propuesta. El proyecto consiste en tres etapas de desarrollo de dos prototipos. El primer prototipo consiste en el desarrollo del nodo inteligente. El segundo corresponde al desarrollo de software y hardware para la planta tratadora de datos.

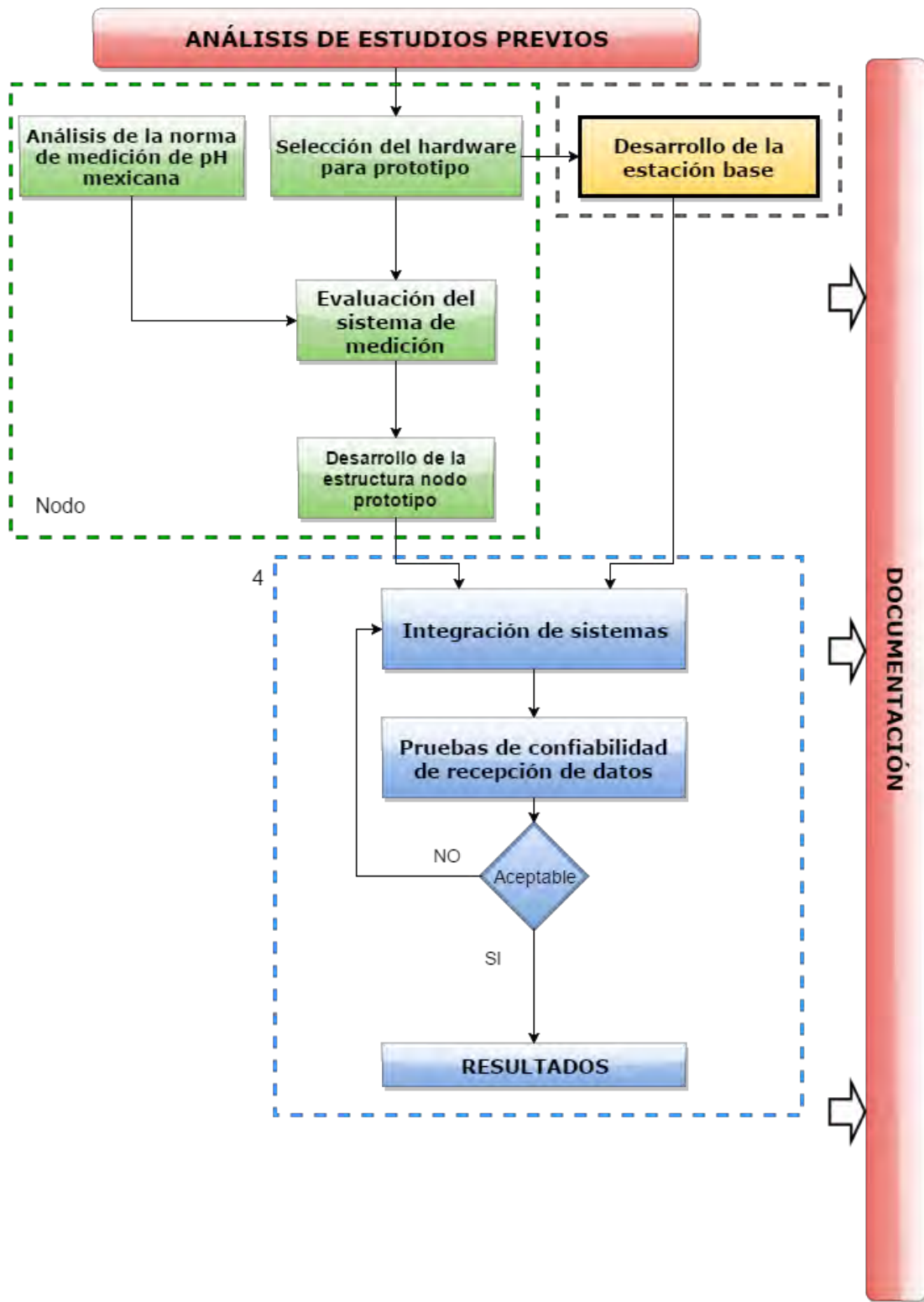


Figura 3.2. Metodología de la investigación

3.1 Análisis de estudios previos o estudio del arte del proyecto

Con el fin de realizar un análisis detallado del estado del arte con relación a la aplicación final del proyecto, se debe buscar estudios que de preferencia, las variables a medir sean las mismas y los objetivos de investigación sean similares.

Realizar una recopilación de tecnologías actuales similares que contengan la realización de prototipos de monitoreo de la calidad del agua, enfocándose en aquellas que por sus resultados obtenidos, posean más importancia para el proyecto.

Los estudios de mayor relevancia son aquellos donde las investigaciones se desarrollen a nivel prototipo, analizando por lo menos el pH y la temperatura del agua y en los que se realice una plataforma software para el análisis e interpretación de los datos. Aquellos estudios que sobrepasen los objetivos de esta investigación también serán considerados, principalmente aquellos que entre sus variables de medición, contengan las variables mencionadas.

Finalmente llevar a cabo una comparación del compendio de metodologías enfocándose en los aspectos individuales que más proporcionen valor a esta investigación. Cabe mencionar que los estudios que se deben de incluir, tendrán que poseer el enfoque principal de monitorear la calidad del agua en tiempo real y con redes de sensores, con énfasis en el monitoreo del pH y la temperatura.

También serán considerados estudios que su área de aplicación sea el desarrollo de software o tecnologías de información, enfocados a la administración de redes de sensores inalámbricos.

3.2 Etapa 1. Desarrollo de nodo

Los nodos de monitoreo son la unidad principal que ejecutará la función de monitoreo. Tienen como función principal recolectar los datos de temperatura y pH del agua

monitoreados. Los sensores de pH tendrán instalados sensores de temperatura para poder realizar la compensación de los datos recolectados. Al mismo tiempo, los nodos configurarán la red inalámbrica basada en el protocolo ZigBee. A través de esta red los nodos enviarán la información a la estación base la cual realizara la interpretación de los datos.

3.2.1 Análisis de norma mexicana para la medición del pH

Es muy importante para la investigación llevar a cabo el análisis de la norma actual de medición del pH. Si en un futuro el método se busca normalizar, la norma servirá como guía para llegar a ese objetivo. A continuación se describen los pasos que se llevaran a cabo para la comparación con dicha norma.

Llevar a cabo un análisis de la norma NMX-AA-008-SCFI- 2011 sobre análisis del agua y determinación del pH- método de prueba. La cual es aplicada por la empresa en su prueba actual de pH y temperatura del agua.

Debido a que el método planteado no se encuentra normalizado, se deben analizar los criterios de la norma con respecto a la aplicación que tendrá el método utilizado en esta investigación, así como las implicaciones y limitantes de esta.

3.2.2 Pruebas experimentales con sensores inteligentes



Figura 3.3. Desarrollo de nodo

En la figura anterior se muestra en detalle el proceso de pruebas experimentales. Se deben de considerar por lo menos dos propuestas de hardware para cada elemento del sistema (sensores, micro controlador), teniendo como principal objetivo el costo accesible y la baja complejidad de uso de estos sistemas.

Debido a la naturaleza del proyecto, se deben de considerar elementos que estén listos para la aplicación los cuales eviten la necesidad del desarrollo de tecnología nueva. Los elementos pueden ser sistemas de fuente abierta que se enfoquen en el desarrollo de aplicaciones electrónicas.

Desarrollar un sistema con elementos de costo accesible, que tenga la posibilidad de medir el pH y la temperatura. Los datos que proporcione dicho sistema deberán de ser confiables y mantenerse estables conforme a los rangos deseables de medición. Se deberán buscar sensores listos para su aplicación y no aquellos que sean integrables a otros dispositivos microcontroladores. Cabe mencionar que el objetivo no es desarrollar un sensor de pH, sino la aplicación de uno para el monitoreo de la calidad del agua.

Para comprobar la estabilidad del sistema conforme a los rangos de medición, se tendrá que realizar una prueba en diferentes niveles de la variable de medición. Esta prueba requerirá de un procedimiento de limpieza del electrodo para asegurar que el valor de referencia medido no afectará al siguiente. El proceso requerirá la limpieza del electrodo a través de agua destilada. Después se realizará un secado con toallas absorbentes.

Se debe de diseñar una rutina de muestreo a través del software de programación del microcontrolador elegido. Esto debido a que el microcontrolador tiene la función de inicializar el sistema, recibir y ejecutar órdenes y memorizar parámetros de la calidad del agua. Esta rutina debe de evaluarse conforme a los tiempos de muestreo que serán establecidos para la creación del prototipo.

3.2.3 Desarrollo de un sistema de comunicación.

Se deberá de integrar al sistema de medición de pH un sistema de comunicación inalámbrica a través de redes de sensores que actúen inteligentemente. El sistema deberá de usar el protocolo ZigBee basado en la comunicación 802.15.4. Se utilizarán los módulos inalámbricos de bajo costo y bajo consumo de energía Xbee para fines de la realización del prototipo.

Se deberá de conocer el software para asegurarse de que el sistema de comunicación no tenga ningún problema al formar la red o identificar dispositivos. Cada nodo contará con su propio sistema de comunicación, el cual interactuará con el microcontrolador para el envío de datos a través de la red.

Se deberán de realizar pruebas individuales con cada dispositivo de comunicación, estas pruebas se enfocarán en el correcto funcionamiento de estos dispositivos como por ejemplo transmisión de datos, comprobar que todos los dispositivos estén en la misma red y asegurarse de cuál dispositivo corresponde a un punto de la red. Por lo tanto, la red tendrá que ser sencilla, asignando a cada nodo su función conforme al protocolo de comunicación. Para este diseño se considerarán los dispositivos que tendrán la labor de monitorear y los que tengan la labor de comunicar.

3.3 Etapa 2. Evaluación del sistema de medición del pH.

Para asegurarse que el nodo este proporcionando datos correctos y estables, se realizará una evaluación por el método de análisis de variancia (ANOVA) conforme al tiempo de medición de cada nivel de pH que serán expuestos los sensores. La prueba se realizará en las tres sustancias más comunes al efectuar la calibración de electrodos de pH. Los niveles son de 4, 7 y 10 en la escala de pH. Para el cambio de sustancia, como se mencionó anteriormente, se debe de diseñar un procedimiento que asegure la limpieza del electrodo para que la medición de cada nivel sea independiente de las otras. A continuación se muestran los pasos a seguir para llevar a cabo este análisis:



Figura 3.4. Evaluación del sistema de medición (elaboración propia)

- Realizar una evaluación del sistema por medio del método ANOVA, donde se consideren la variación del sistema conforme al uso constante (tiempo) y a la temperatura que será expuesto. Esta evaluación tendrá como sustento un análisis estadístico y el soporte de un laboratorio de metrología ya sea por parte de la universidad o la empresa.
- Realizar el análisis del sistema tomando en cuenta el sensor de temperatura, el sensor de pH así como la interacción con el micro-controlador.
- Realizar una comparación con un medidor de pH calibrado con las 3 sustancias de prueba de 4, 7 y 10 en la escala de pH en ambos dispositivos. Para cada sustancia, utilizar el método de cambio que se definirá. El dispositivo deberá de estar calibrado por un laboratorio de metrología certificado para asegurar la confiabilidad de la medición.

3.3.1 Desarrollo de la planta receptora de datos

La planta receptora de datos se compondrá del dispositivo de recepción y el software. Este dispositivo será un radio especial adecuado con otro tipo de antena para tener

mayor cobertura. El dispositivo estará montado en una estructura o caja sencilla que se pueda conectar al computador con facilidad. La otra función de esta caja es proteger al dispositivo. Los pasos para llevar a cabo la planta receptora se muestran a continuación:



Figura 3.5. Desarrollo de planta tratadora (elaboración propia).

Desarrollar un sistema receptor de datos el cual cuente con una plataforma de software para el análisis, visualización e interacción con la red de sensores. Existe la posibilidad de buscar un software actual de análisis, pero para la recepción de datos provenientes de los nodos, se debe de realizar una aplicación para transformar los datos en tablas. Estos datos después pueden ser analizados en otro software de análisis estadístico.

El sistema receptor (hardware) será solamente un radio acondicionado en una estructura diseñada para que el usuario tenga una sencilla interacción reduciendo riesgos de daños a los componentes. El dispositivo requiere ser acondicionado para ser la estación base conforme al protocolo planeado.

Desarrollar una plataforma de visualización y transformación de la información proveniente de sensores. La información se debe de almacenar en bases de datos en un formato que pueda ser usado en otros programas.

3.4 Etapa 3. Diseño de estructura

El objetivo de la estructura para el nodo será únicamente de almacenar los distintos dispositivos que conforman al nodo. Otro objetivo es la portabilidad del sistema para la realización de pruebas en sitio. Debido a esto una fuente de energía requiere ser agregada para poder llevar a cabo las mediciones. Dicha fuente debe de ser considerada en el diseño de la estructura. Los pasos generales del diseño se muestran a continuación:

- Diseñar una estructura para el montaje del sistema de medición del pH considerando el espacio que requieren cada uno de los dispositivos para definir la distribución de estos.
- Realizar prototipos por medio de tecnologías de impresión 3D para pruebas de ensamble. Se utilizarán los laboratorios de la Universidad de Sonora para realizar propuestas de carcasas y llevarlas a cabo en material plástico.
- Por ultimo realizar una propuesta de estructura para el prototipo ya aplicado en sitio. Las necesidades de esta propuesta deberán de ajustarse a las de los objetivos planeados. La estructura deberá tener la capacidad de tomar mediciones en sitio por un tiempo determinado sin tomar en cuenta una fuente de energía propia. Se debe de dar un tiempo de operación del prototipo, por ejemplo si se utiliza una batería recargable se deberá definir el tiempo que el prototipo puede estar en funcionamiento.

3.5 Etapa 4. Pruebas de confiabilidad del sistema

Integrar los sistemas de comunicación. Realizar las pruebas de comunicación de recepción de datos y comprobar que los sistemas se comunican entre sí. La prueba de comunicación estará enfocada en la confiabilidad de la recepción de los datos transmitidos en la red. Esto debido a la importancia de los datos que se transmiten en

el sistema, por eso mismo se debe de asegurar que la información llegue segura y sin muchos retardos con respecto al momento en que se tomó.

La prueba consistirá en examinar el envío de datos con los rangos máximos del radio en un lugar abierto y lejos de interferencias, donde los sensores se encuentren visibles entre ellos. La prueba puede ser realizada por medio del software que se utilizará para la designación de dispositivos y creación de la red. Se deberá tener la capacidad de análisis de envío y recepción de paquetes para comprobar la calidad de la información.

El ambiente de la prueba será un campo en las afueras de la ciudad para darse una idea del funcionamiento en sitios abiertos. Una vez obtenidos los datos de la recepción de paquetes, se deben de utilizar estudios estadísticos para comprobar la confiabilidad del sistema ante el ambiente. Si la prueba no es convincente se tendrá que volver al análisis de la integración de los sistemas o elegir otro dispositivo que pueda lograr los objetivos deseados.

3.6 Estructuración de la documentación

Realizar la documentación apropiada sobre cada etapa de la metodología de investigación. Hacer énfasis descriptivo en los apartados de desarrollo de tecnología como lo es la sección de desarrollo del sistema de medición y el desarrollo del software de la plataforma.

Para la sección de desarrollo del sistema de medición, se debe de incluir el diagrama de conexión así como el código fuente en el caso del microcontrolador. Para el caso de este último, se deberá de explicar a detalle las rutinas llevadas a cabo a través del código fuente.

Para la creación de la estructura se debe de incluir los diagramas CAD 2D así como modelos 3D. Estos modelos deberán de tener los acotamientos correspondientes conforme al diseño propuesto.

4. IMPLEMENTACIÓN

En este capítulo se describe la implementación del prototipo de medición del pH y temperatura del agua. En resumen, se realizó un análisis de la norma para poder ajustar la forma de medición al método normalizado. Después se realizó la selección de los elementos de hardware para comenzar con la elaboración del sistema nodo. Las pruebas y prototipos realizados son con la finalidad de probar los sistemas en conjunto.

4.1 Análisis de la norma de medición del pH

Como se mencionó anteriormente, la medición del pH de agua es de alta importancia para uso ya sea industrial o doméstico. Los valores cambiantes de pH pueden ser tóxicos para organismos acuáticos ya sea directa o indirectamente. De la misma manera el pH es el parámetro más importante utilizado en la determinación de la corrosión en un ecosistema acuático.

La medición es importante para el trabajo efectivo de procesos de tratamiento de aguas y su control (Secretaría de Economía, 2000). Esta norma mexicana es de aplicación nacional y establece el método de prueba para determinar el pH en aguas naturales, salinas, residuales y tratadas. De igual manera, el método es aplicable a todos los tipos de agua y muestras de aguas en el intervalo de pH 3 a pH 10.

La norma mexicana describe los distintos métodos de medición del pH los cuales fueron descritos brevemente en el capítulo 2. Los puntos de interés para esta investigación se dividen en cuatro aspectos mostrados en la siguiente figura:



Figura 4.1. Puntos relacionados con la norma mexicana de medición del pH

Según la norma el sistema de medición de electrodo de vidrio tendrá una diferencia de potencial nula (0 volts) entre $\text{pH} = 6.5$ y $\text{pH} = 7.5$, usando un electrodo de referencia similar al electrodo de referencia que tiene membrana de vidrio, la resistencia de la membrana de los electrodos de vidrio será $R_m < 10^9 \Omega$. De la misma manera la celda puede también ser un electrodo combinado comercialmente disponible.

En este caso, las especificaciones del electrodo de vidrio usado son similares a los de la norma mexicana. La única diferencia es la solución de calibración para el cuidado del electrodo que se usaría en el mantenimiento.

4.2 Desarrollo de un sistema con capacidad de medir el pH

El sistema nodo es la parte más importante del sistema de medición, ya que aquí recae la mayor parte de la confiabilidad que tendrán los datos. Por lo tanto, el desarrollo del nodo será la parte de enfoque de esta investigación. Si bien los sistemas de software

y análisis son de alta importancia, estos servirán de apoyo para futuras investigaciones.

4.2.1 Arquitectura y descripción de elementos del sistema

La creación del primer prototipo se llevó a cabo con la finalidad de evaluar el sistema de medición a través del análisis de variabilidad que se muestra en este capítulo. No se tuvieron en cuenta aspectos de diseño de estructura para su funcionalidad en el campo, ya que solamente se requería la funcionalidad del sistema para el análisis y la confiabilidad de datos. En la figura siguiente se muestra la arquitectura de la totalidad del sistema que se llevó a cabo para la elaboración del prototipo.

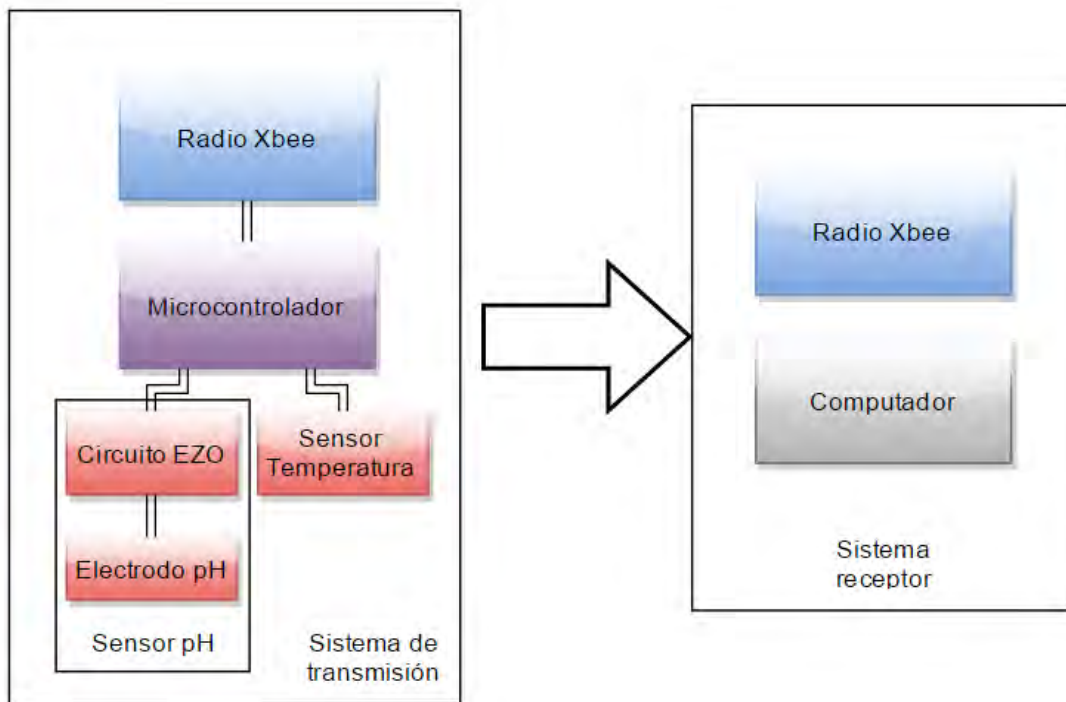


Figura 4.2. Arquitectura del Sistema de medición (elaboración propia)

El sistema consiste de un sistema emisor, el cual envía los datos de medición (temperatura y pH) a través del protocolo ZigBee. Después el sistema receptor adquiere los datos para su interpretación a través de un computador. Los elementos individuales del sistema y su descripción se muestran a continuación:

- Microcontrolador (MC). Se utilizó un MC Arduino UNO, basado en el chip ATmega328. Este tiene 14 salidas y entradas digitales (de las cuales 6 pueden ser moduladores de ancho de pulso), 6 entradas analógicas, un oscilador de cristal de 16MHz, conexión USB, un conector para energía, un conector ISP y un botón de reseteo. SaintSmart UNO está basado en el tablero original de código y hardware abierto creado por Arduino (SaintSmart, 2015).
- Sensor pH y Circuito EZO. A diferencia de muchos sensores que proporcionan los datos de forma analógica, el circuito de pH tipo incrustado EZO de AtlasScientific, ofrece el más alto nivel de estabilidad y precisión. Con una configuración apropiada el circuito puede llegar o exceder la precisión y exactitud encontrada en la mayoría de los medidores de pH de laboratorio. El sensor posee la capacidad de lecturas de 0.001 hasta 14.000 en el rango de pH con una exactitud de +/- 0.02, lecturas dependientes o independientes de la temperatura, protocolos flexibles de calibración y modo de lectura sencilla o continua (AtlasScientific, 2015).
- Sensor de temperatura. El sensor de temperatura DS18B20 de DALLAS SEMICONDUCTORS a prueba de agua posee una interfaz de 1 cable para su comunicación, provee lecturas de temperatura de 9 a 12 bit. La información se envía/recibe al sensor a través de la interfaz de 1 un cable, esto hace posible la conexión de varios sensores de temperatura en un solo puerto. Las lecturas pueden ser de -55°C hasta 125°C con una exactitud de +/- 0.5°C. Las aplicaciones de este incluyen controles termostáticos, sistemas industriales, termómetros, entre otras (SparkFun, 2015).
- Comunicación inalámbrica. Los módulos utilizados Xbee ZB S2 proveen conectividad inalámbrica efectiva en costo a dispositivos electrónicos. Estos son ideales para aplicaciones en los mercados de control y de energía. Poseen una comunicación a través del protocolo Zigbee con un rango de hasta 40 metros en lugares urbanos y hasta 120 metros en lugares abiertos. Su poder de

transferencia es de 3 dBm. Poseen una interfaz serial con soporte de 1200 b/s a 1Mb/s. Los requerimientos de voltaje son de 2.1V a 3.6V con un consumo de corriente de 40mA al transmitir, 40mA al recibir y 15mA en espera. La temperatura de operación es de - 40°C a 85°C (Digi, 2015).

- Computador. Para la interpretación de los datos se desarrolló un software en el lenguaje de programación Python. Debido a las posibilidades del lenguaje, el software posee ciertos requerimientos que puedes ajustarse a cualquier computador ya sea con sistema operativo Windows o Linux.

4.2.2 Funcionamiento de nodo

La figura 4.3 muestra el diagrama de funcionamiento del nodo. El MC se conecta a través del puerto serial (físico) (pines 0 TX y 1 RX) hacia los pines 2 y 3 del Xbee con una conexión inversa. El MC tiene la opción de crear librerías seriales por lo cual los pines 2 y 3 se conectan a los pines de conexión del circuito de pH. El sensor de pH es conectado a los pines correspondientes del conector BNC hembra. El sensor de temperatura es conectado al pin 10 a través de la unión de una resistencia de “pull up” y la fuente 5V.

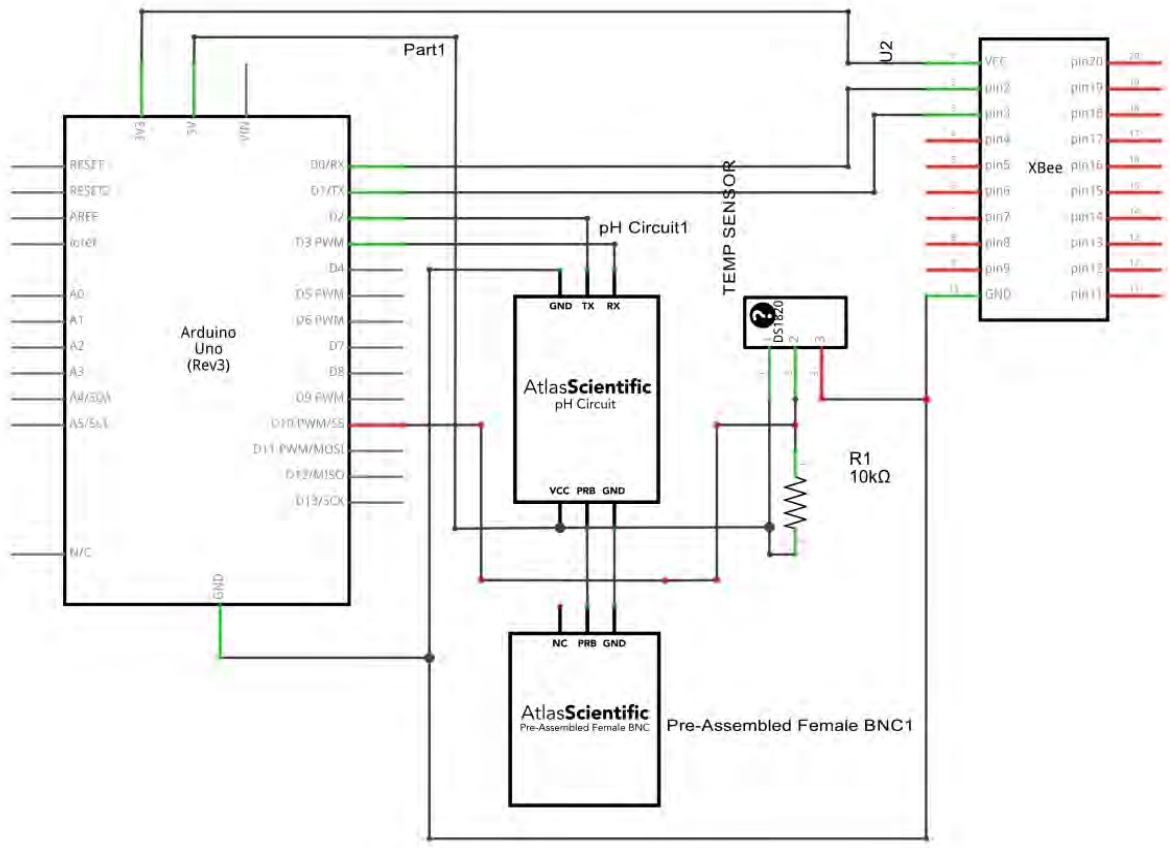


Figura 4.3. Esquemático de nodo (elaboración propia)

En la figura 4.4 se muestra el diagrama de flujo que sigue el programa del microcontrolador, las etapas e interacciones se describen a grandes rasgos. En la siguiente sección se detallará la descripción del código fuente que contiene el microcontrolador para realizar esta rutina.

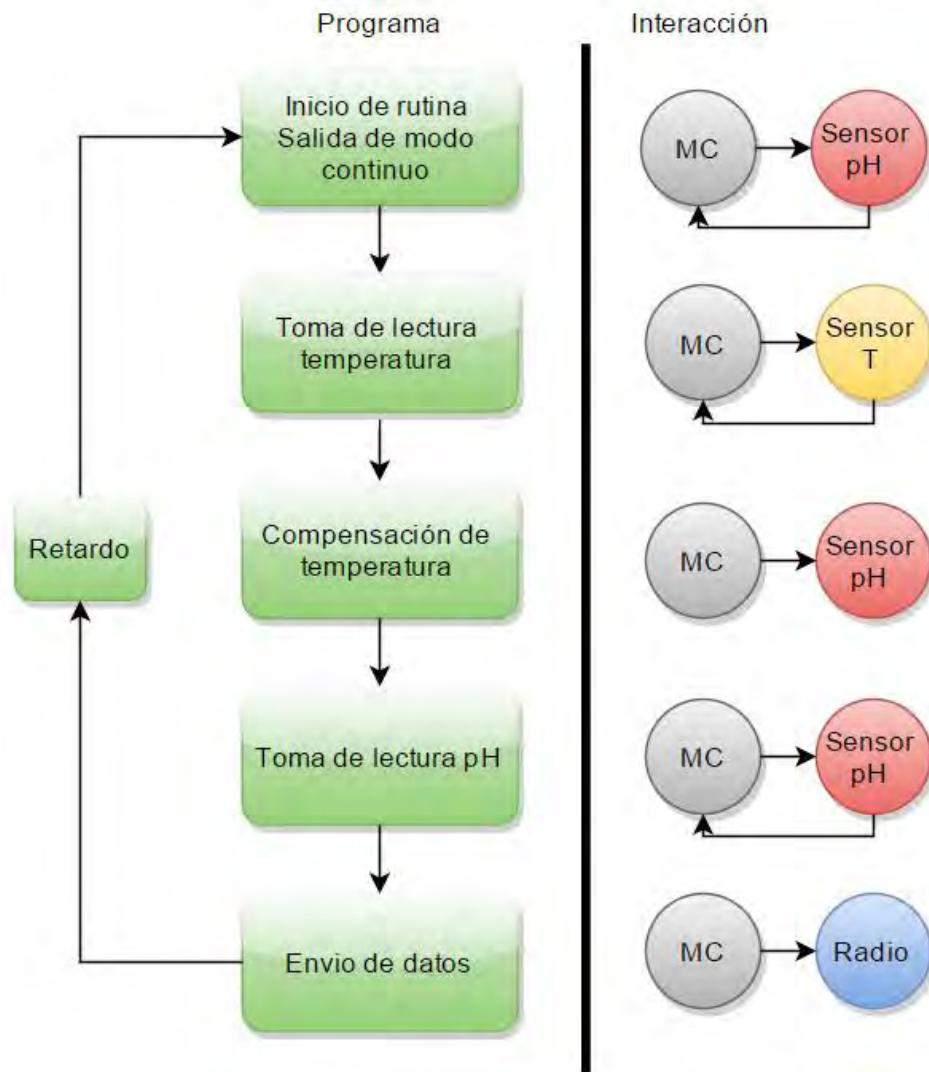


Figura 4.4. Diagrama de proceso de programa del microcontrolador (elaboración propia)

- Inicio de rutina. Como se vio anteriormente, el circuito EZO esta normalmente en una configuración de lecturas continuas, debido a esto el microcontrolador requiere mandar un comando para cambiar a lectura sencilla. Una vez enviado el comando, el circuito de pH responde y el microcontrolador está listo para la siguiente etapa.
- Toma de lectura temperatura. El MC manda una señal a la dirección en la que se encuentra el sensor de temperatura con interfaz de 1 cable. El sensor

responde y manda la lectura en grados centígrados para después ser almacenada por el MC en una variable.

- Compensación de temperatura. El MC envía la variable de temperatura en forma de ASCII a través del puerto serial hacia el circuito de pH. El circuito responde con OK.
- Toma de muestra pH. El MC manda un comando al circuito de pH ordenándole tomar una muestra, el circuito la devuelve y esta es guardada en una variable.
- Envío de datos. Ambas variables pH y temperatura son enviadas a través del puerto serial físico del radio Xbee.
- Retardo. Debido a que las etapas 1-5 ocurren muy rápido, se agregó una opción de retardo entre lecturas, esta opción puede ser modificada conforme al plan de monitoreo deseado.

Finalmente, como se muestra en la Figura 4.5, el prototipo se montó en una estructura provisional para fines de prueba de los sistemas conjuntos.

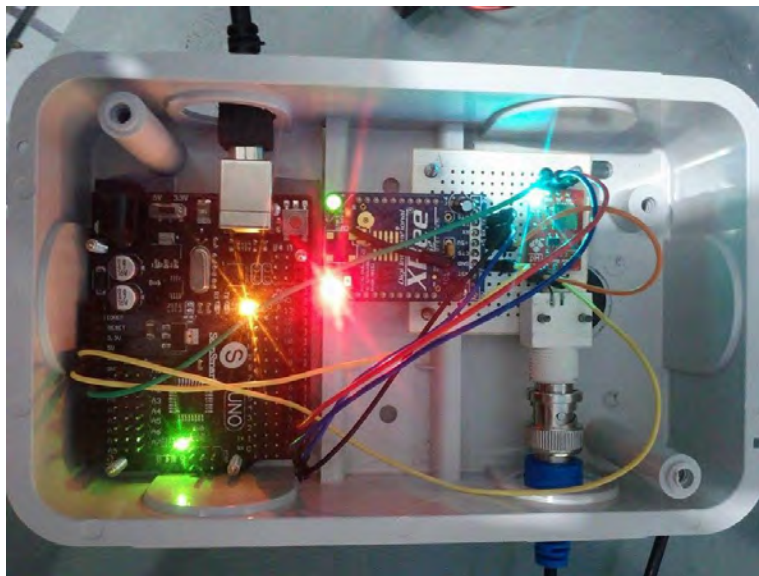


Figura 4.5. Estructura de montaje temporal

4.3 Evaluación del sistema de medición

La importancia de la validación de un sistema de medición recae en la validez de sus datos. Cualquier entidad que ofrezca un servicio crítico tiene un alto nivel de conocimiento que el cliente no poseerá. El cliente tiene la confianza de poder confirmar resultados reportados y solo los cuestionará cuando surge una controversia. Por lo tanto, las organizaciones tienen una clara responsabilidad de corresponder la confianza del cliente, proporcionando la respuesta correcta a la parte analítica del problema (Ríos, 2014).

Esto lleva implícito que las pruebas a realizar son apropiadas para la parte analítica del problema que el cliente desea resolver y que el informe final presenta los datos analíticos de tal manera que el cliente los entiende fácilmente. Para que un resultado analítico concuerde con el resultado requerido debe de ser lo suficientemente confiable para que cualquier decisión basada en este pueda tomarse con confianza.

4.3.1 Procedimiento de verificación de la variación del instrumento Atlas Scientific y microcontrolador Arduino.

El siguiente experimento tiene la finalidad de proporcionar la variación del sistema conforme a los días de prueba en las sustancias de 4, 7 y 10 de pH.

Materiales:

- 5 jeringas esterilizadas de 3 ml para los líquidos: pH4, pH7, pH10.
- Solución para guardar la probeta con el electrodo (SG).
- Agua destilada (AD).
- Circuito medidor de pH y temperatura.

Consideraciones generales:

- La medición se llevó a cabo con la calibración proporcionada por Atlas y conforme al orden asignado 7-4-10.
- Originalmente la probeta se encuentra en la solución para guardado.
- Se midió la temperatura del líquido a medir así como la temperatura ambiente del laboratorio.
- Previo a cada procedimiento de baño, el sensor de temperatura se encuentra tomando datos de la solución que se va a medir.
- Después de que se realiza cada uno de los baños el sensor es extraído, es secado y se baña con agua destilada y se vuelve a secar con las toallas absorbentes para prepararse para la próxima solución.

Procedimiento de baño y cambio de solución a medir:

- Se llena la jeringa de agua destilada y se procede a bañar el electrodo aplicando presión a la jeringa a una distancia de 2 cm aprox.
- Se seca cuidadosamente el electrodo con papel absorbente y se le da un minuto a que evapore.
- Se llena la jeringa con la solución a probar en este caso la solución 4 y se vuelve a bañar la jeringa conforme al paso 2.
- Se introduce el electrodo en la solución y se empieza a tomar nota de las mediciones.
- Se repite el procedimiento para cada cambio de solución a medir y finalmente se repite para la solución de guardado donde permanece el sensor.



Figura 4.6. Procedimiento de cambio de sustancia

A continuación se muestran los resultados de las mediciones conforme a los distintos días de medición para cada sustancia (Tabla 1-2). El muestreo se realizó con el dispositivo tomando mediciones constantemente durante 15 días, realizando 5 mediciones para cada sustancia. La finalidad de este muestreo fue para comprobar que el dispositivo poseía estabilidad conforme al tiempo que estuvo expuesto a cada sustancia. Como se mencionó en capítulos anteriores, la temperatura es un factor que afecta el pH. Por ello, la temperatura fue controlada en el lugar de ensayo y los valores medidos en cada punto de medición fueron registrados.

Buffer pH 4						TempAmb 23° C	
Día / medición	1	2	3	4	5	TempLíquido	
1	4.002	3.993	4.002	3.998	3.998	24.06	
2	3.992	3.996	3.999	3.995	3.997	24.5	
3	3.996	3.996	4	3.994	3.994	25.1	
4	3.993	3.999	4	3.998	3.992	25.3	
5	3.995	4.001	3.991	3.991	3.994	24.4	

Tabla 4.1 Resultados para la solución 4

Buffer pH 7						TempAmb 23° C	
Dia / medición	1	2	3	4	5	TempLiquido	
1	7	7.003	7.002	7.001	6.996	24.06	
2	7	6.994	6.996	6.996	6.999	24.5	
3	6.996	6.997	6.993	6.998	6.993	25.1	
4	6.991	6.992	6.993	6.996	6.995	25.3	
5	6.99	6.994	6.996	6.993	6.997	24.4	

Tabla 4.2 Resultados para la solución 7.

Buffer pH 10						TempAmb 23° C	
Dia / medición	1	2	3	4	5	TempLiquido	
1	9.991	9.989	9.992	9.986	9.99	24.06	
2	9.993	9.988	9.99	9.993	9.988	24.5	
3	9.99	9.99	9.988	9.99	9.999	25.1	
4	9.996	9.992	9.99	9.992	9.989	25.3	
5	9.993	9.989	9.987	9.988	9.986	24.4	

Tabla 4.3 Resultados para la solución 10.

Una vez obtenidas las mediciones, se realizó un estudio de análisis de varianza para determinar la variación conforme a los días de medición. Un análisis de variancia (ANOVA) es un método estadístico usado para evaluar las diferencias entre dos o más medias. El ANOVA se usa para evaluar diferencias generales (Menin, 2009).

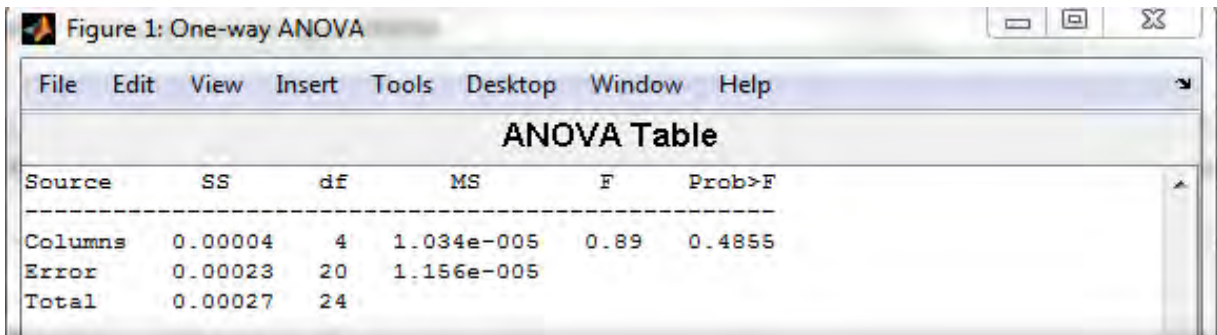
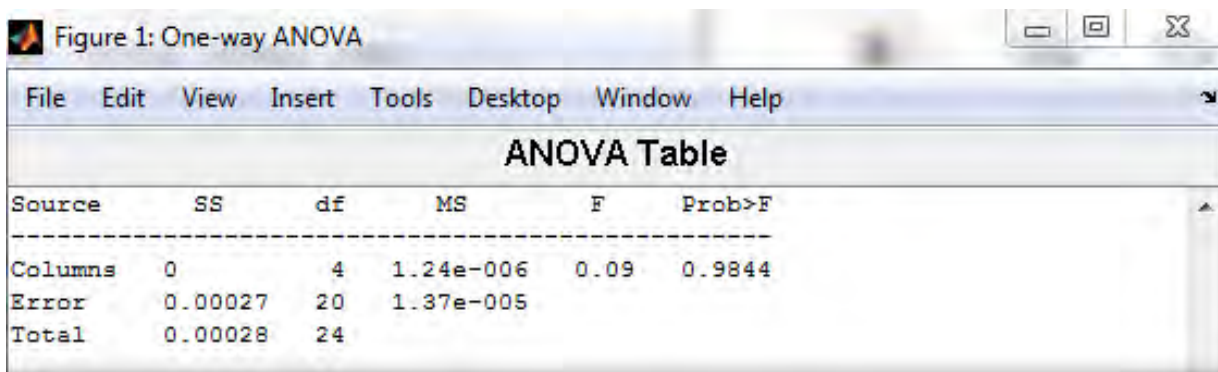
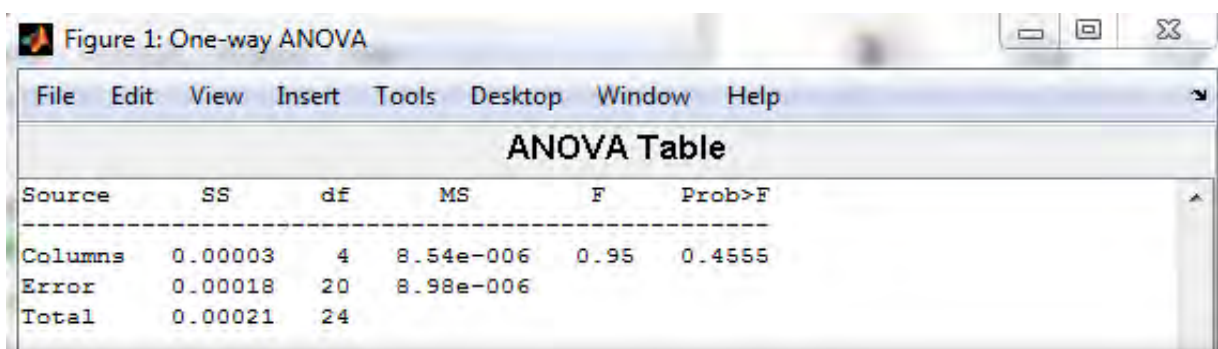


Figura 4.7. Resultados para solución de pH 4



Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Columns	0	4	1.24e-006	0.09	0.9844
Error	0.00027	20	1.37e-005		
Total	0.00028	24			

Figura 4.8 Resultados para solución de pH 7



Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Columns	0.00003	4	8.54e-006	0.95	0.4555
Error	0.00018	20	8.98e-006		
Total	0.00021	24			

Figura 4.9 Resultados para solución de pH 10

En todos los casos (figuras 4.7, 4.8 y 4.9) al llevar a cabo el análisis de varianza se obtiene que la probabilidad es mayor al 0.05 o 5% y que además el F calculado es menor que el F crítico. Con lo anterior se concluye que no hay diferencias significativas entre los datos de las columnas o, dicho de otra forma, no hay diferencias significativas entre los días de haberse realizado las mediciones del pH.

4.4 Desarrollo del sistema de comunicación

La red planeada para el sistema se compone de diversos nodos que envían la información de las mediciones a una estación base. Para llevar a cabo este objetivo cada elemento del sistema contiene un radio que trabaja con el protocolo ZigBee el cual fue descrito en capítulos anteriores. En la figura 4.10 se muestra la arquitectura del sistema de medición de calidad del agua que se tiene planeado diseñar.

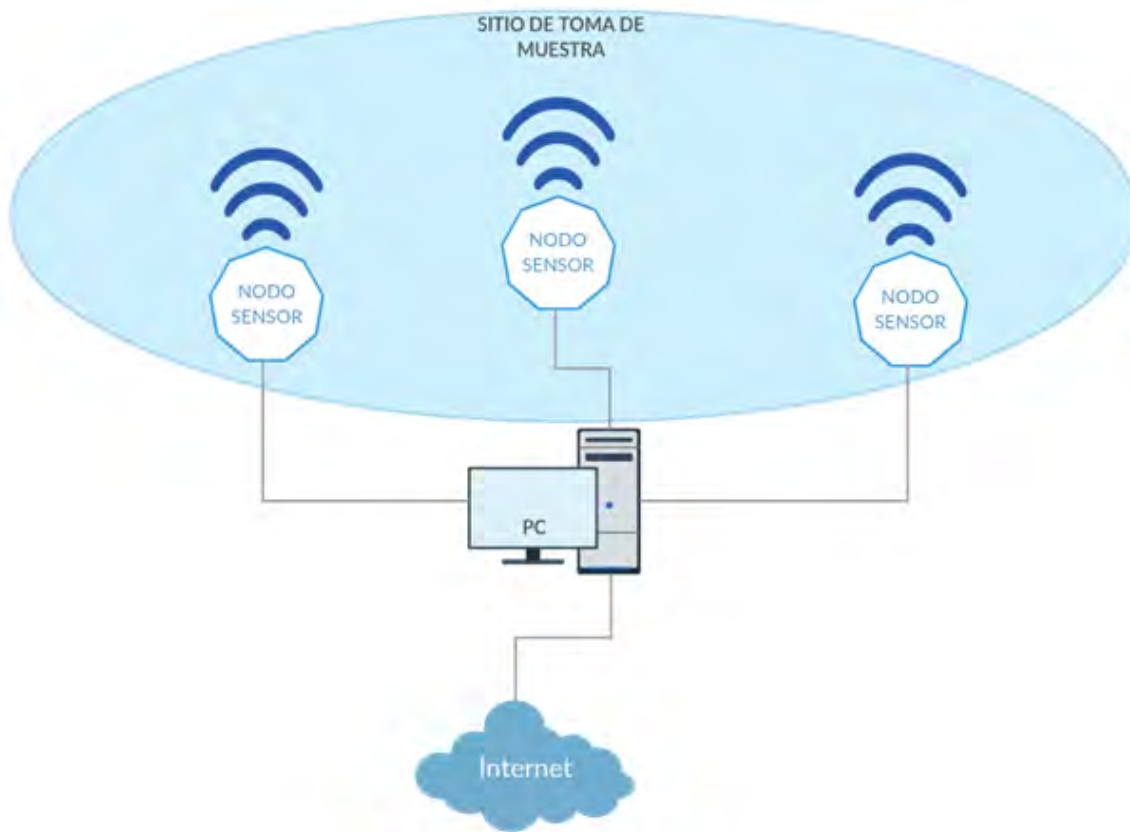


Figura 4.10 Arquitectura del sistema de medición de la calidad del agua

La calidad de la comunicación dependerá de diversos factores externos e internos al sistema. En el caso de los externos solo se considerará la transmisión de datos en ambientes cerrados o urbanos y ambientes abiertos. Otros factores que influyan en la transmisión de los datos no serán considerados. Internamente, la potencia del hardware, velocidad de transmisión, entre otros, son factores que afectarán la transmisión de la información. Estos factores dependen en su totalidad del elemento de comunicación que en este caso es el radio XBee.

Como se mencionó en capítulos anteriores el protocolo de comunicación ZigBee tiene la capacidad de contener 3 tipos de dispositivos de comunicación:

- El coordinador que es el que crea la red.
- El enrutador que crea las rutas para dispositivos finales.

- El dispositivo nodo final.

Dependiendo del lugar de aplicación y el plan de monitoreo los dispositivos en la red pueden variar. La red requiere obligatoriamente de un coordinador y otro dispositivo para poder comunicar datos. En el caso de esta investigación se utilizaron dos radios que funcionan como enrutadores o dispositivos de comunicación y una estación base para la recepción de los datos. Cabe mencionar que debido al presupuesto limitado solo uno de los nodos sensores estará realizando mediciones en tiempo real, el otro será solamente simulado. Sin embargo, la simulación que otorgue el nodo de comunicación servirá para el análisis de recepción de datos. En la Figura 4.11 se muestran ambos dispositivos de comunicación que se utilizarán en el proyecto.

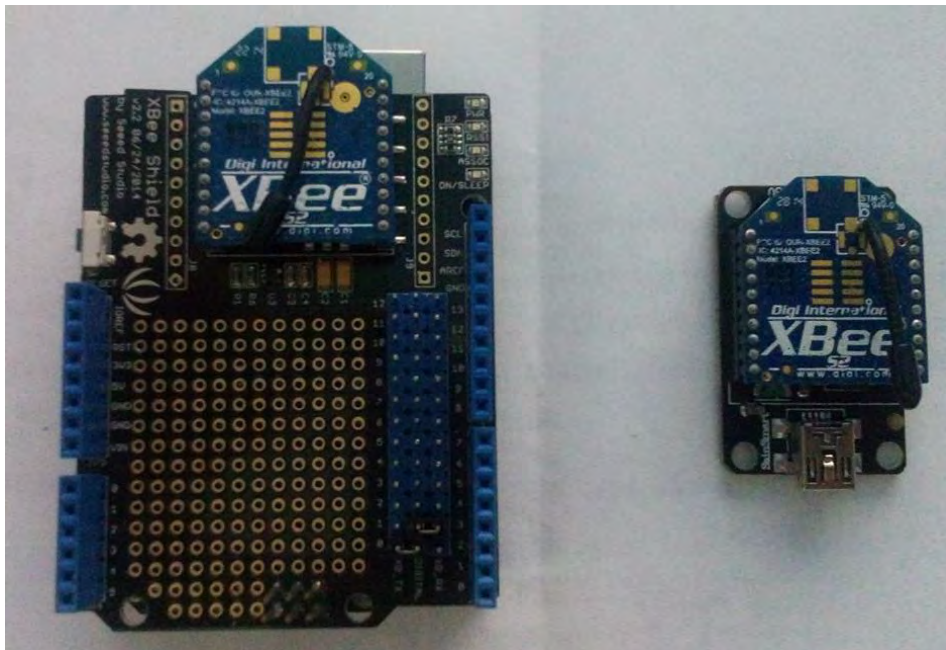


Figura 4.11 Radio nodo y radio de estación base.

Antes de poder transferir datos entre dispositivos se necesita asignar a cada radio la función que desempeñará en la red. Esto se lleva a cabo por medio del software creado por la compañía DIGI llamado XCTU. El software es una plataforma de nueva generación para la configuración de dispositivos RF. Es una aplicación gratuita compatible con Windows, MacOS y Linux (DIGI, 2015).

La configuración de cada radio se lleva a cabo asignando la función a través de X-CTU. Uno de los requerimientos de transmisión es que los radios deben de estar en la misma red. La red se puede configurar asignando una dirección de área personal (DAP) la cual todos los radios compartirán. Esta dirección es de 16 bit brindando una gran capacidad de dispositivos de comunicación en una red. En la Figura 4.12 se puede observar la interfaz del software para la configuración de los radios.

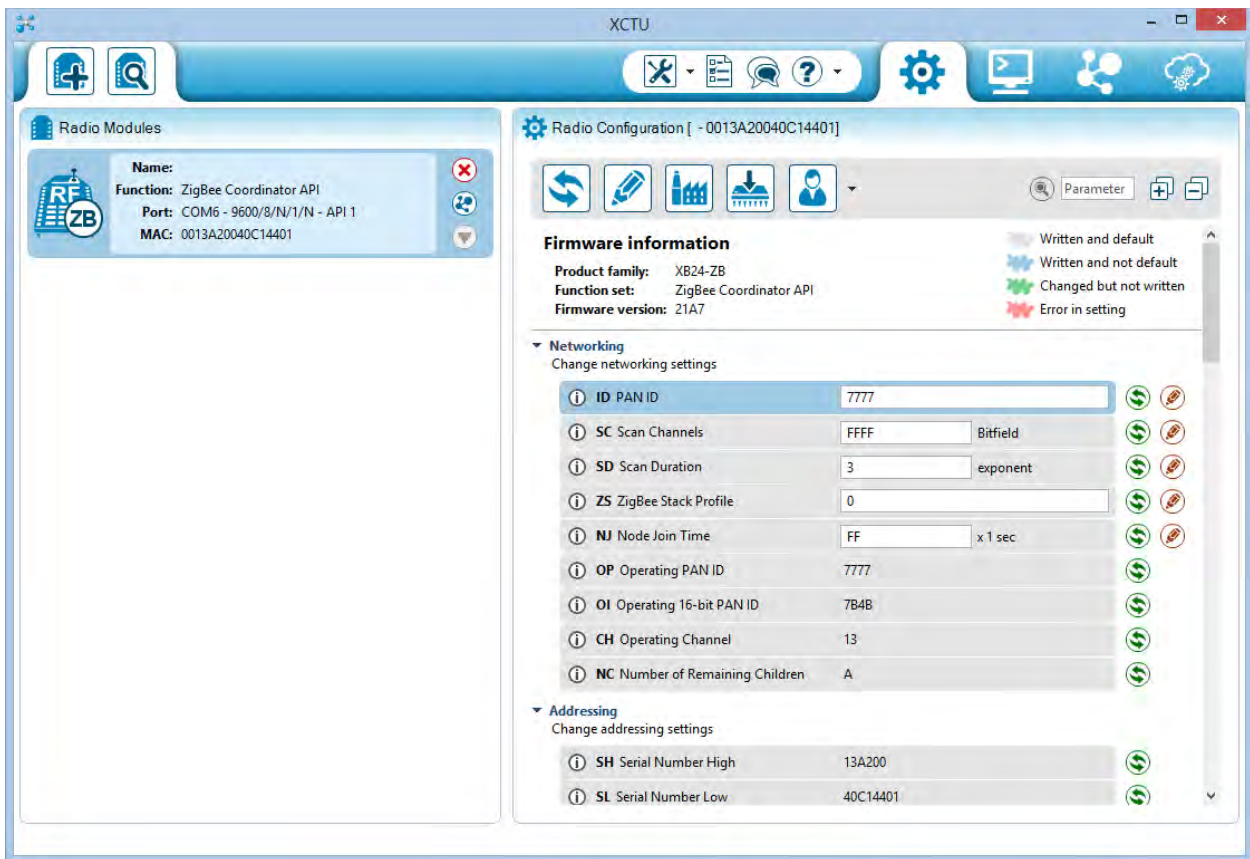


Figura 4.12 Software X-CTU (DIGI, 2015).

Una vez configurados los radios se procede a realizar una prueba de comunicación sencilla para comprobar que ambos estén en la misma red y los datos lleguen correctamente. Si bien los radios poseen una comunicación transversal entre diferentes dispositivos, en esta investigación solo llevará a cabo una comunicación desde el sistema nodo a la estación base.

A continuación se muestra el resultado de la prueba de transmisión de datos entre dos dispositivos:

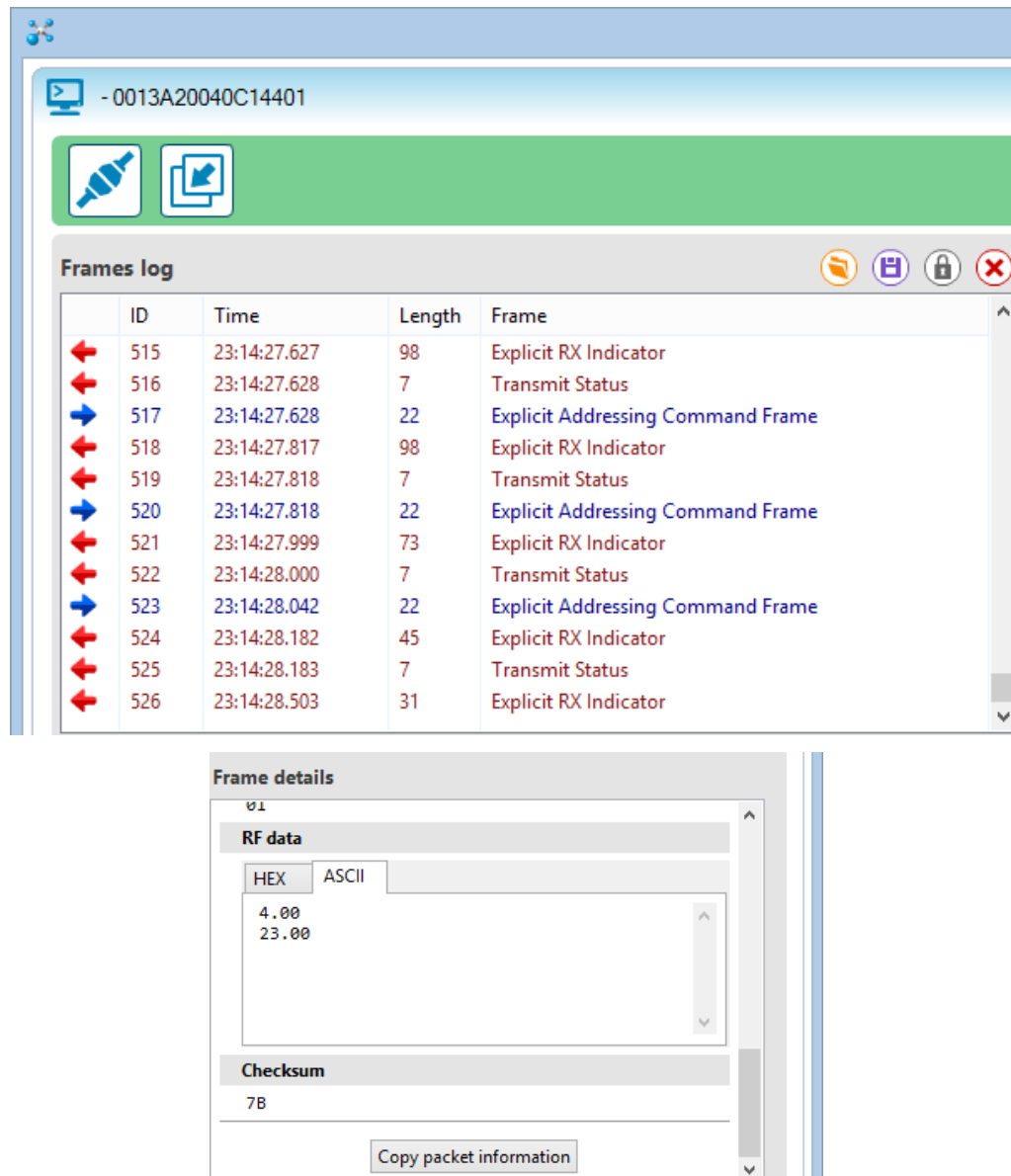


Figura 4.13 Prueba entre dispositivos Software X-CTU (DIGI, 2015).

En la comunicación se enviaron dos datos, un valor de pH simulado y un valor de temperatura como se muestra en la Figura 4.13. En registro de eventos (Frame log) se

puede observar que los dispositivos están comunicándose entre sí, enviando paquetes de transmisión de datos. Así mismo, se observa la descripción de cada evento. Para el caso de la transmisión hacia el coordinador podemos observar que los eventos de indicadores de RX explícita es la información proveniente del radio que se encuentra en el nodo. Con esto se comprueba que la comunicación entre dispositivos es exitosa y se puede proseguir a unirlos a los demás elementos del sistema.

4.5 Desarrollo de la estructura del nodo

Debido a la sensibilidad de los componentes del sistema, hubo la necesidad de crear una estructura temporal de montaje para llevar a cabo las pruebas. La estructura tuvo la única finalidad de almacenar los componentes. No se tomaron en cuenta otros aspectos técnicos para su realización. La estructura se compone solamente de una base la cual está adaptada para ensamblar a los dispositivos del sistema nodo. En la figura 4.14 podemos observar un diagrama explotado de los componentes en el nodo.

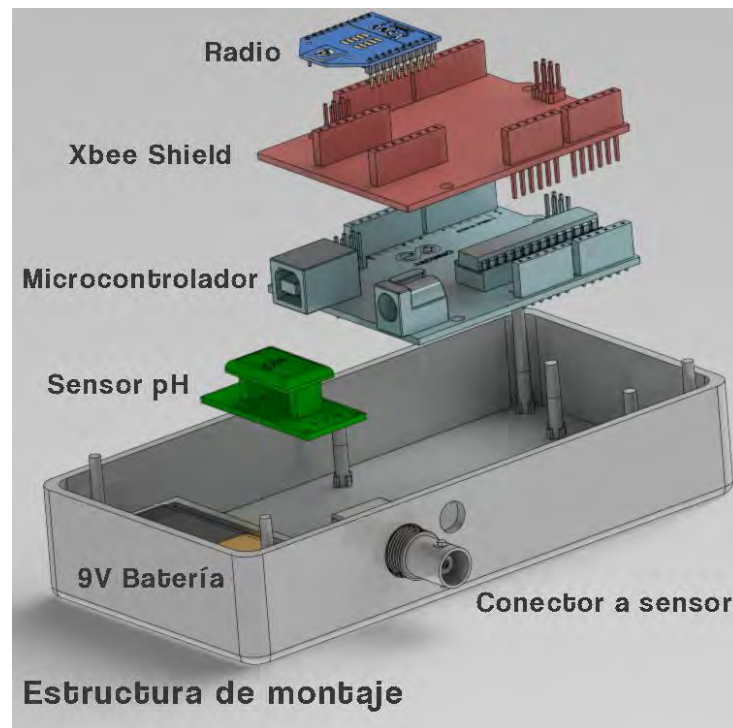


Figura 4.14 Diagrama de elementos del nodo.

Las bases sirven de apoyo para los componentes. Estas fueron realizadas conforme a los orificios de la plataforma microcontrolador y el adaptador para el radio comunicador. El ensamble de estos sistemas se realiza de una forma sencilla colocándolos uno arriba del otro. En sensor de pH (verde) y la sonda se ensamblan a través del tornillo roscado que se encuentra en el conector para la sonda (Figura 4.15). La fuente de alimentación, la cual es una batería de 9V, se encuentra instalada a presión en el compartimiento mostrado en la imagen (Fig. 4.14). Esta batería se agregó de forma temporal para la evaluación del prototipo de forma portable en el sitio de medición.

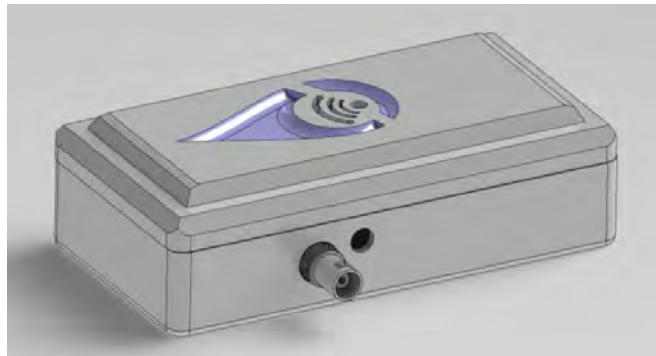


Figura 4.15 Estructura para sistema de medición (elaboración propia).

En la estructura propuesta a continuación el módulo de energía se encuentra independiente al módulo de monitoreo.

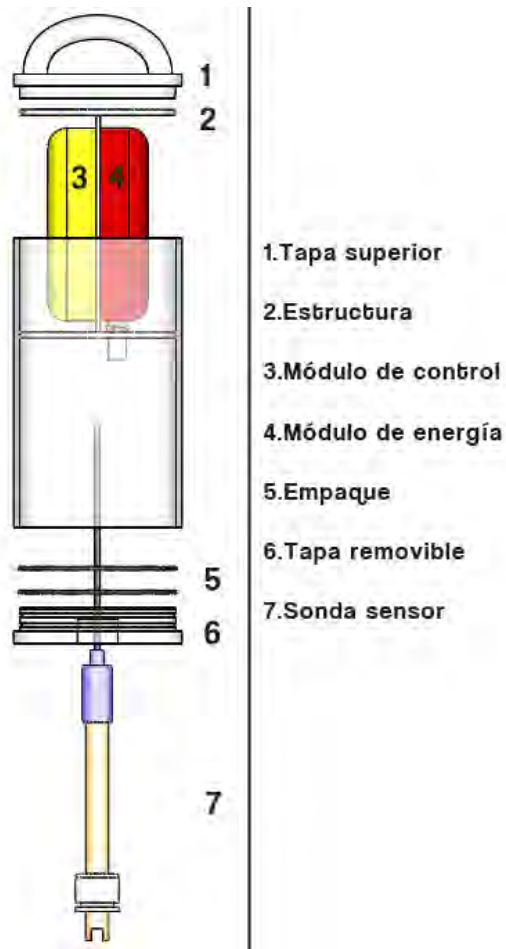


Figura 4.16 Estructura propuesta para el sistema.

En la figura 4.16 la estructura propuesta para el sistema es mostrada. El módulo descrito anteriormente corresponde al número 3 de color amarillo. La estructura será de forma cilíndrica de material de acrílico para economizar costos. Los elementos del sistema se describen a continuación:

1. Tapa superior. Esta tapadera se encontrará fija a la estructura por lo tanto no podrá removerse. Este elemento tiene como objetivo la manipulación de la totalidad de la estructura.
2. La estructura de montaje estará diseñada para colocar los módulos de energía y de control o censado. Esta estructura podrá removerse del sistema para cuando se requiera.

3. El módulo de control o modulo sensor como fue descrito en la sección de desarrollo de nodo, se encargará de medir, transformar y enviar la información obtenida.
4. El módulo de poder estará encargado de suministrar energía al sistema. Cabe mencionar que el sistema no cuenta con una alimentación de energía externa renovable. Debido a que aún no se definen los periodos de muestreo para el sistema, la adición de una fuente externa de energía como solar o eólica esta aun sin fundamento. Estudios futuros ayudarán a definir si el sistema lo requiere.
5. Sellos de plástico. La estructura contendrá sellos para reducir la humedad que entra al sistema. Esto debido a que, si bien el sistema no estará instalado de forma sumergida, la humedad puede ser un problema.
6. Capa removible. Una vez armado el sistema e instalada la capa fija, la capa removible servirá para retirar de forma segura a los elementos del sistema cuando se requiera.
7. La sonda de pH estará separada por medio de un conector que reduce la humedad que pueda filtrarse por el cable este conector estará instalado en la tapa removible.

Cabe mencionar que la propuesta de este sistema es una idea abstracta de su posible implementación. Una vez teniendo el módulo de control o monitoreo terminado, otros sensores de calidad del agua pueden agregarse modificando solamente la estructura del módulo y no la estructura de montaje del sistema. En la Figura 4.17 se muestra una representación en tercera dimensión de la estructura propuesta.

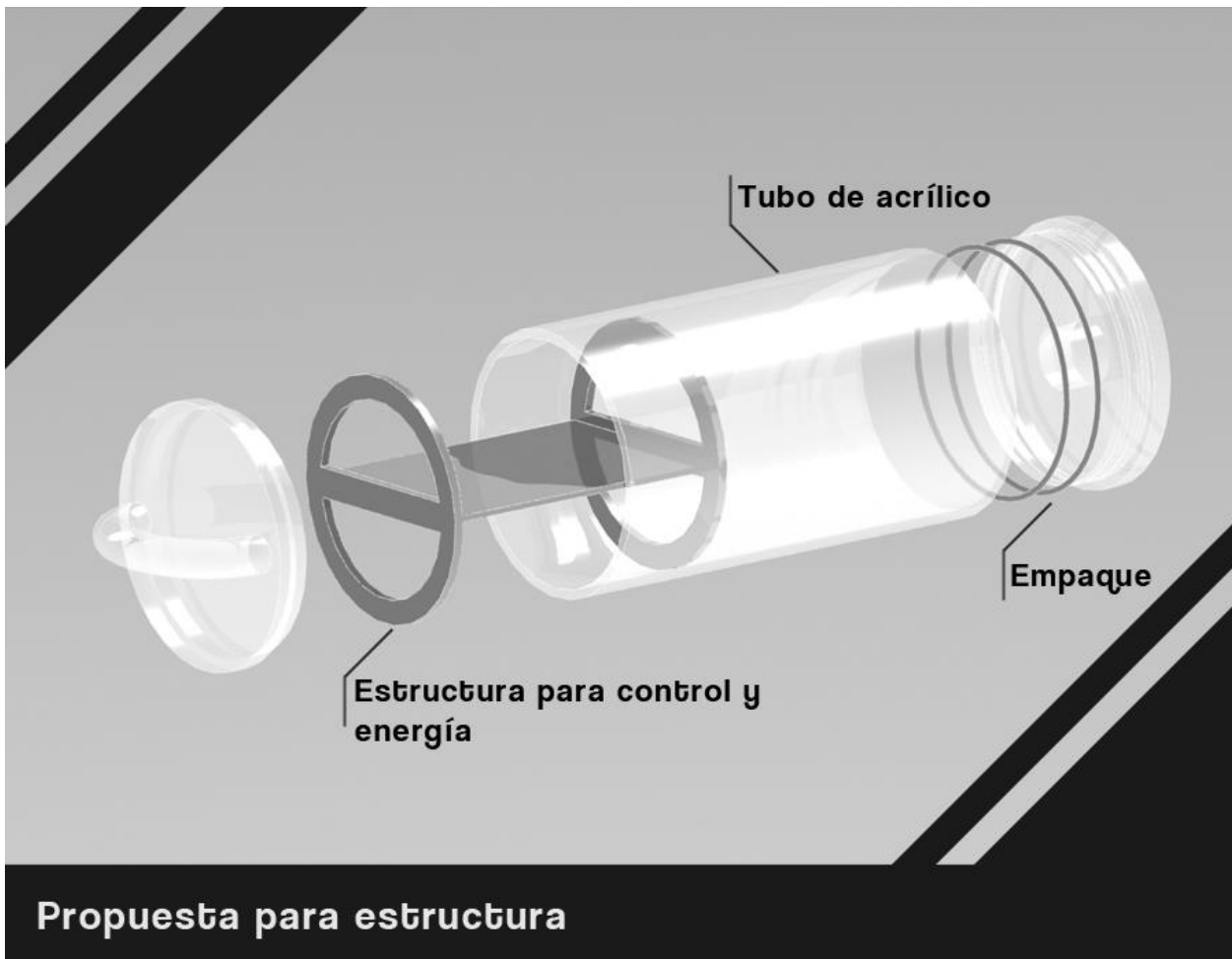


Figura 4.17 Estructura propuesta para el sistema.

4.6 Desarrollo de la planta receptora de datos

El desarrollo de un software dedicado tiene una complejidad alta que por sí solo, podría ser un proyecto de investigación. Debido a esto se optó que el software de la planta tratadora sólo realizara funciones básicas de tratamiento de los datos. Las funciones a realizar se muestran en la figura 4.18. El proceso de transformación de los datos se compone de dos grandes etapas, la etapa que se realiza externamente al computador y la etapa interna que se realiza por medio del software.

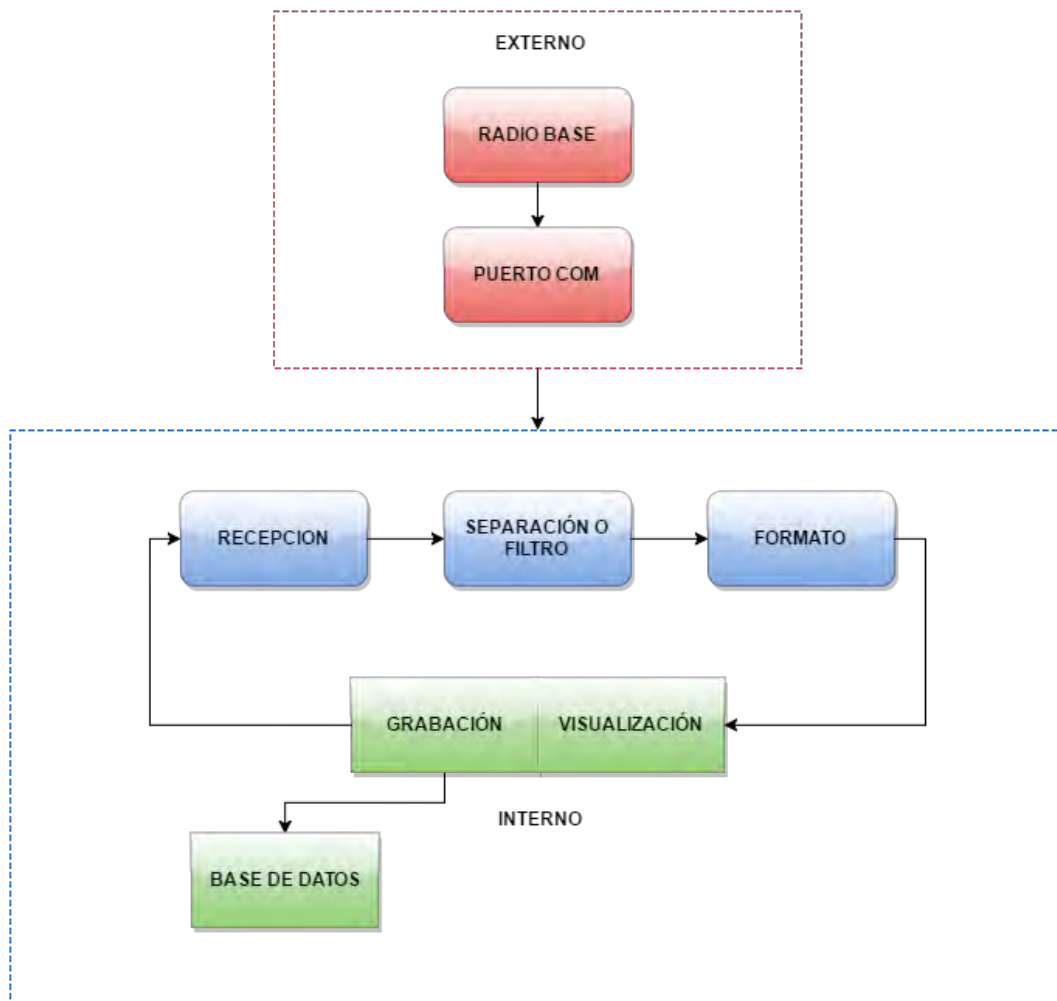


Figura 4.18 Estructura propuesta para el sistema.

La etapa externa se compone del radio base y la transferencia de datos por medio de la interfaz USB con el puerto COM del computador. La información proveniente de los nodos es transferida al computador por medio de un puerto predefinido.

La etapa interna como se muestra en la figura 4.18, es a grandes rasgos el diagrama de flujo del software, la descripción de cada una de los pasos se muestra a continuación:

- **Recepción de datos:** Los datos provenientes de los radios poseen un cifrado o una “palabra” especial la cual ayuda a identificar que la información recibida

proviene de un emisor en el protocolo ZigBee. El sistema reconoce la palabra por medio del código y procede a realizar el procesamiento de esta.

- Separación o filtro. Si bien al inicio sólo se dispondrá con dos sistemas de nodos y un coordinador o estación base, a futuro la red contendrá gran variedad de emisores los cuales transportarán información similar al coordinador. Para ayudar con esto, el software identifica los datos que corresponden a cada sensor y al mismo tiempo cuál información pertenece a las lecturas de temperatura y cuál información a las del pH.
- Formato. Una vez separados los datos de cada sensor el sistema tendrá la capacidad de asignar a cada paquete de datos sus debidas etiquetas. Las etiquetas iniciales serán las de temperatura, pH, sensor y hora de toma de la medición. De la misma manera esta palabra servirá para el formato que se exportara para el archivo de base de datos.
- Grabación y visualización. Una vez preparados los datos, se envían a la etapa de grabación en un archivo externo formato .txt y a la visualización en la gráfica propuesta. La grafica contendrá las mismas etiquetas con la capacidad de cambiar de nodo de entrada.

Para el sistema se realizó una propuesta de interfaz de usuario (figura 4.19) que puede ayudar en un futuro como referencia a la creación de un software dedicado a la interpretación y análisis de datos provenientes de los sensores. La interfaz se compone de los siguientes elementos:

1. Diagrama interactivo de red. En este diagrama se mostrarán todos los nodos que se encuentran en la red y se tendrá la posibilidad de interactuar con ellos para recaudar la información individual.

2. La gráfica de medición en tiempo real del sensor elegido. En este apartado se puede observar las mediciones provenientes del nodo, teniendo la posibilidad de elegir la variable a medir.
3. La selección del puerto en el cual se encuentra conectada la estación base. Esto debido a que los ordenadores poseen distintos puertos y normalmente el sistema no se estará conectando en el mismo puerto.
4. Este botón tendrá la función de detectar los nodos que se encuentran en la red para poderlos visualizar en la pantalla del punto número 2.
5. Normalmente se necesita saber datos técnicos de los nodos como por ejemplo la dirección o potencia de transmisión. Este botón puede tener la capacidad de realizarlo.
6. Por ultimo un botón de restauración o “reset” por si sucede algún congelamiento en el software.

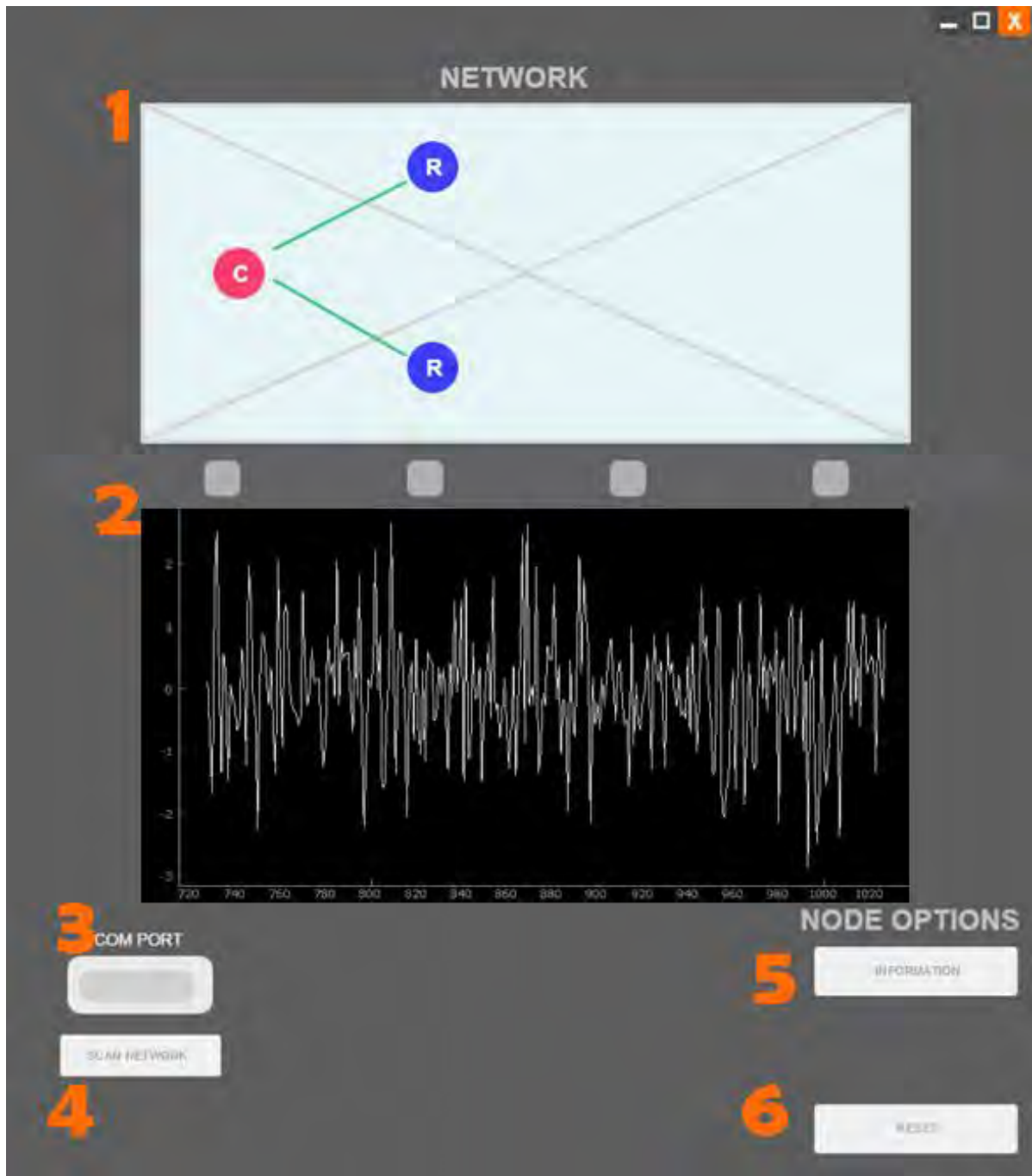
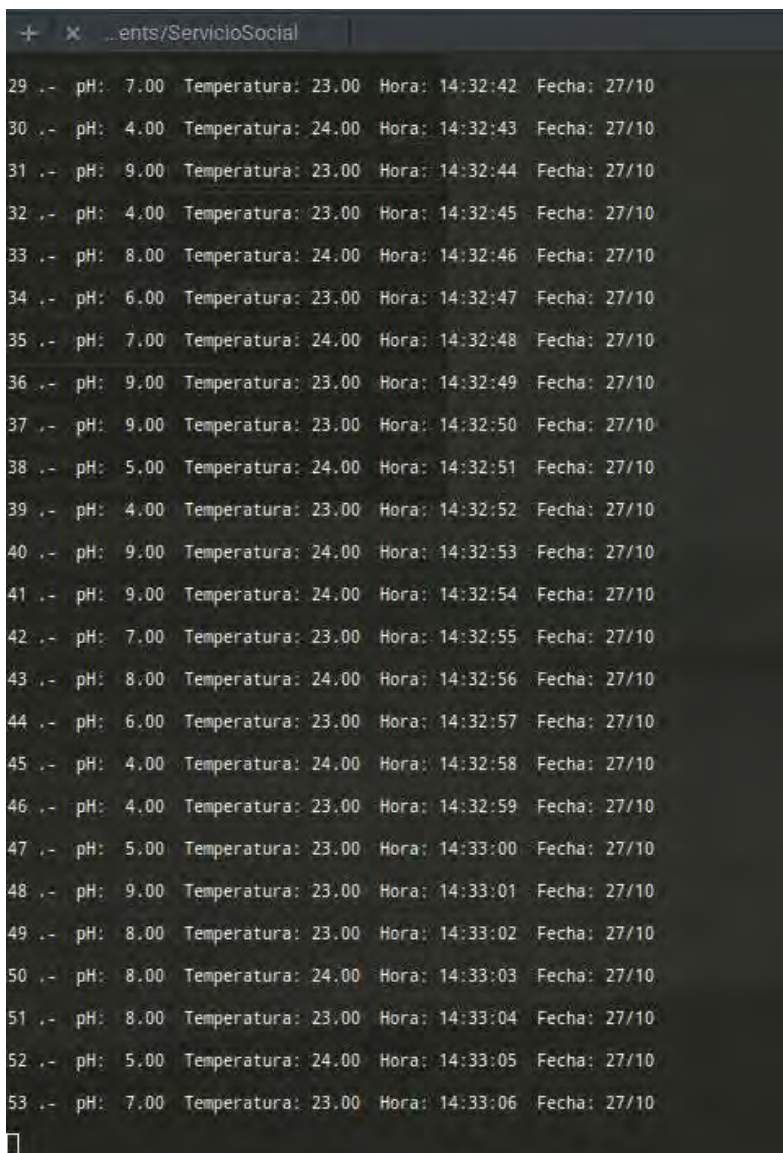


Figura 4.19 Interfaz propuesta.

Una prueba fue realizada conectando dos dispositivos a la red con la estructura descrita en capítulos anteriores y utilizando el proceso descrito en la figura 4.17. Los resultados de los datos se muestran a continuación:



Linea	pH	Temperatura	Hora	Fecha
29	7.00	23.00	14:32:42	27/10
30	4.00	24.00	14:32:43	27/10
31	9.00	23.00	14:32:44	27/10
32	4.00	23.00	14:32:45	27/10
33	8.00	24.00	14:32:46	27/10
34	6.00	23.00	14:32:47	27/10
35	7.00	24.00	14:32:48	27/10
36	9.00	23.00	14:32:49	27/10
37	9.00	23.00	14:32:50	27/10
38	5.00	24.00	14:32:51	27/10
39	4.00	23.00	14:32:52	27/10
40	9.00	24.00	14:32:53	27/10
41	9.00	24.00	14:32:54	27/10
42	7.00	23.00	14:32:55	27/10
43	8.00	24.00	14:32:56	27/10
44	6.00	23.00	14:32:57	27/10
45	4.00	24.00	14:32:58	27/10
46	4.00	23.00	14:32:59	27/10
47	5.00	23.00	14:33:00	27/10
48	9.00	23.00	14:33:01	27/10
49	8.00	23.00	14:33:02	27/10
50	8.00	24.00	14:33:03	27/10
51	8.00	23.00	14:33:04	27/10
52	5.00	24.00	14:33:05	27/10
53	7.00	23.00	14:33:06	27/10

Figura 4.20 Prueba con mediciones.

No se encontró ningún problema al realizar las mediciones con distintas sustancias y valores de pH. La única adecuación al software fue el redondeo de ciertos valores de pH debido a que se estaban produciendo caracteres no alfanuméricos. Por último se muestra la gráfica de los valores provenientes del nodo (figura 4.21), con dos variables el pH y el tiempo de la medición.

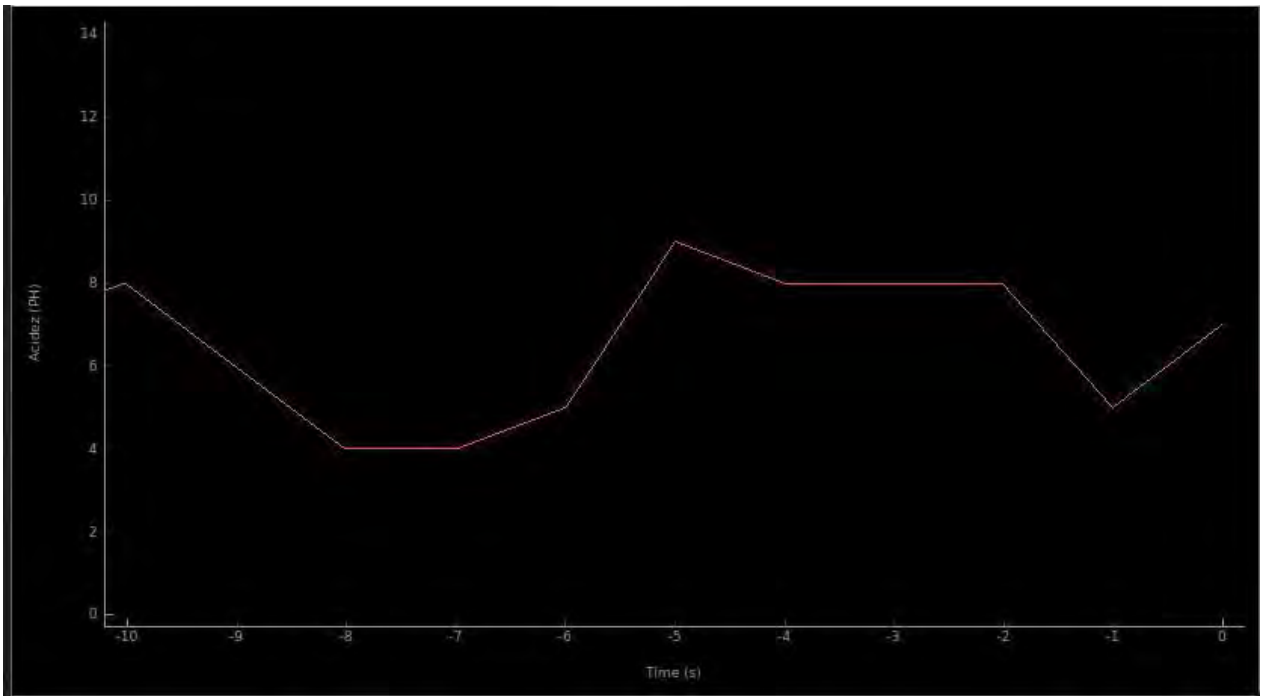


Figura 4.21 Gráfica con datos.

5. RESULTADOS

Para determinar la confiabilidad de los datos se realizó una prueba de campo en un sitio donde el proyecto tiene la posibilidad de ser implementado. La prueba se llevó a cabo en la presa Abelardo L. Rodríguez en el municipio de Hermosillo, Sonora, México, con la localización GPS de 29.06, -110.91. La prueba consistió en dos etapas como se muestra en la siguiente figura.

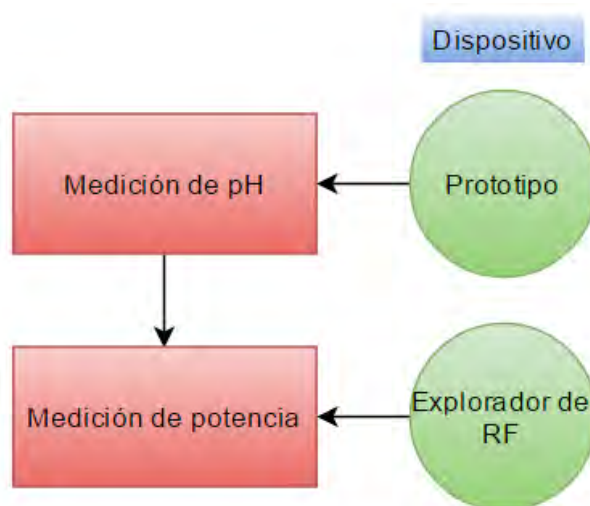


Figura 5.1 Pruebas realizadas.

La medición consistió en poner a prueba el prototipo en un ambiente real tomando valores de temperatura y pH en distintos puntos determinados del día y en diferentes puntos de medición. Los puntos se llevaron a cabo con una distancia aproximada de 15- 20 metros entre punto a punto. Esto para simular la separación que existiría entre una red real. Si bien las mediciones no se realizaron con nodos independientes, el análisis con un solo nodo determina el cambio de pH en los diferentes puntos.

Uno de los aspectos importantes en la medición es que la presa posee un flujo y no se encuentra estancada. Esto es de alta importancia para el medidor, ya que como se mencionó en capítulos anteriores, los humedales con aguas sin movimiento poseen otro rango de valores aceptables.

Se determinó una rutina sencilla de muestreo para obtener los datos necesarios de cada punto de medición como se muestra en la siguiente figura:



Figura 5.2 Rutina de medición.

El primer paso es realizar un muestreo. La duración total del muestreo es de un minuto con tres mediciones por segundo de temperatura y pH. En total se obtienen 180 valores de pH y dos valores de temperatura (al inicio y a los 30 segundos) para el intervalo medido. Se midieron dos valores de temperatura debido al tiempo en que el dispositivo realiza la compensación. Si el sensor de pH compensara la temperatura cada vez que tomara una medición, el tiempo de muestreo se duplicaría. Si bien este valor sería cercano al tiempo actual (aproximadamente 0.33 segundos), en aplicaciones más robustas esto sería un gasto de tiempo y energía. De la misma manera, un cambio repentino en la temperatura puede ser detectado en este intervalo de monitoreo.

En la segunda etapa el dispositivo se duerme por un tiempo de 5 minutos comenzando desde el minuto en que terminó el muestreo. Después de este tiempo, el dispositivo

despierta y comienza con la rutina de nuevo. El tiempo fue decidido con la sola finalidad de simular un muestreo en sitio. En un futuro este tiempo puede modificarse para adaptarse a un plan de monitoreo.

Los puntos de medición fueron determinados solamente por la cercanía entre ellos. Como se muestra en la figura siguiente con la localización en el mapa.



Figura 5.3 Localización de sitios medidos.

A continuación se muestran los resultados de 60 muestras de cada uno de los puntos de medición. Como podemos observar, la presa se encuentra en el rango de pH permitido que es de 6.5 a 8.5 en la escala de pH. Esto considerando solamente los tres puntos medidos, para una aproximación más exacta se necesita construir una red que abarque todo el espacio que ocupa. En las tablas se encuentran los valores de pH, temperatura en centígrados y la hora de la medición en horario de 24 horas.

Sitio 1		
		Hora
pH Promedio	7.561	9:00
Temperatura	23.5	DE 0.317

Tabla 5.1 Resultados para el sitio 1.

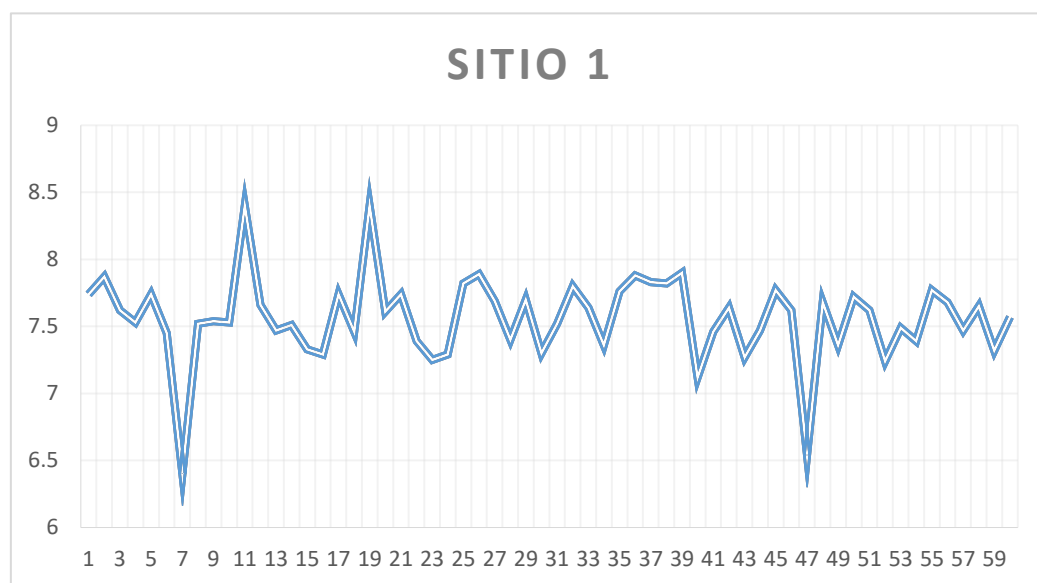


Figura 5.4 Gráfica de resultados sitio 1.

Como podemos observar en el primer y segundo sitio. Los valores de pH son similares con unos cuantos picos que no superan el valor de 9 en la escala y no bajan de 6. Estos valores se tomaron en dos horarios donde la temperatura del agua se encuentra en un estado similar.

Sitio 2		
		Hora
pH Promedio	7.53	18:00
Temperatura	24	DE 0.3212

Tabla 5.2 Resultados para el sitio 2.

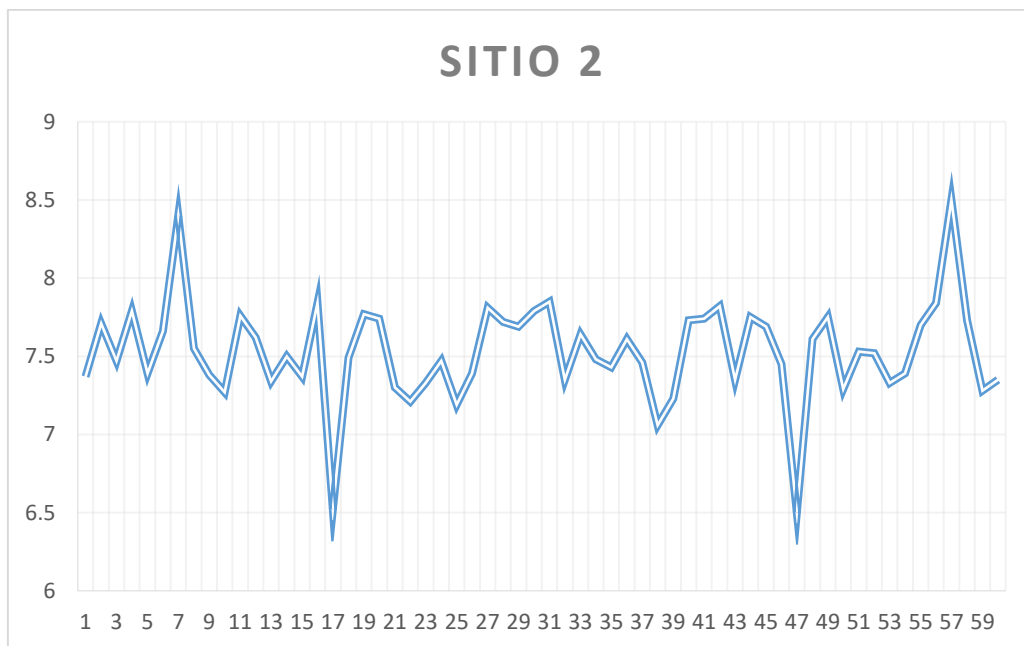


Figura 5.5 Gráfica de resultados sitio 2.

Para el caso del tercer sitio, existe una pequeña variación en el pH del agua. Como se puede observar en la figura 5.6, los valores se encuentran más sobre el valor superior a 8.2. Estos valores fueron tomados a mitad del día cuando la temperatura se encuentra más elevada. Así mismo, estos datos poseen una desviación estándar mayor a la de los otros dos sitios.

Sitio 3		
		Hora
pH Promedio	8.09	12:00
Temperatura	27	DE 0.4118

Tabla 5.3 Resultados para el sitio 3.

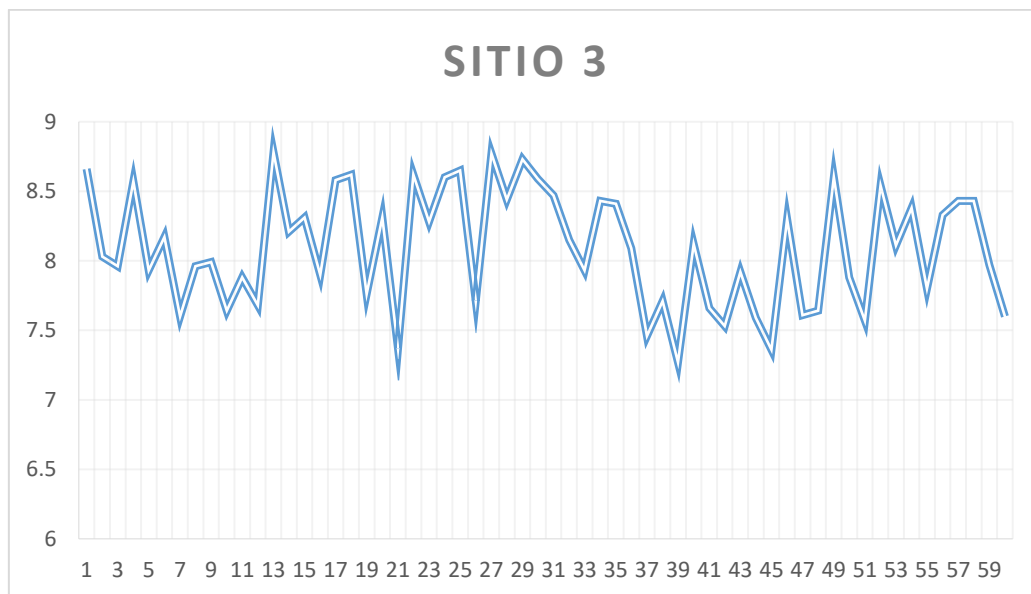


Figura 5.6 Gráfica de resultados sitio 3

Si bien las mediciones son confiables con respecto a los puntos, los tiempos de monitoreo y mantenimiento del sistema deberán de ser analizados posteriormente. Así mismo, la estructura de montaje no posee aun una protección contra fenómenos naturales que tengan un efecto sobre este. Por ello, el sistema deberá poseer una estructura aislante de dichos efectos. En la figura 5.7 podemos observar el prototipo tomando las mediciones en sitio.

La prueba de campo ayudó a confirmar la funcionalidad de los distintos elementos del sistema como fue la medición y el envío de datos. El análisis de alcance de datos se muestra a continuación. Cabe mencionar que esta prueba carece de análisis estadísticos de la información debido a que el único propósito era demostrar la funcionalidad del sistema en sitio. Estos datos pueden servir para un análisis estadístico futuro donde se requiera determinar la calidad del agua de dichos puntos en la presa.



Figura 5.7 Fotografía de montaje en sitio.

Se llevó a cabo una prueba de recepción para comprobar la confiabilidad de los datos entre dispositivos. La prueba consistió en dos estaciones de monitoreo, la primera estación se encuentra en el sitio de la medición y la segunda a 50 metros de distancia visible. Los metros se eligieron por ser la distancia media de la distancia máxima que es descrita en las especificaciones de los radios (DIGI, 2015).

Como se muestra en la figura 5.8 dos computadores fueron utilizados para grabar la hora en la que la medición fue enviada y recibida. La diferencia de tiempos entre ambos datos del mismo valor nos indica el tiempo en el que la medición tarda en llegar a la siguiente estación. Cabe mencionar que el tiempo de muestreo fue reducido para poder recaudar una mayor cantidad de datos. El tiempo elegido fue de 1 segundo por medición. En una aplicación en sitio el tiempo de monitoreo estará definido por el plan de monitoreo. El tiempo de respuesta para la detección de un evento va depender de diversos factores que por su complejidad no se incluyen en esta investigación.

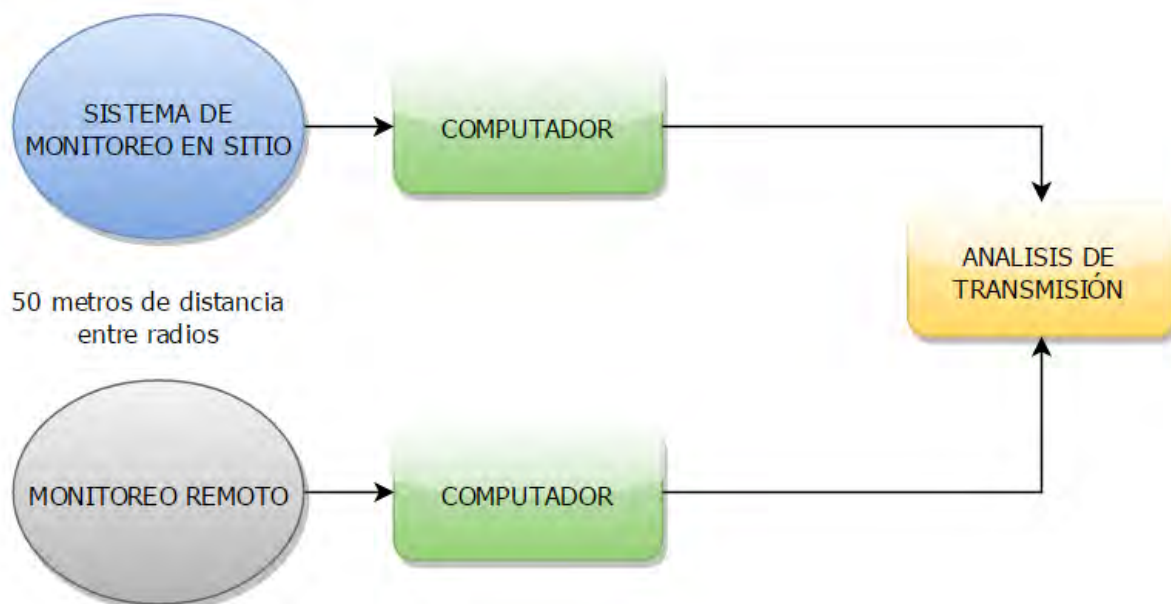


Figura 5.8 Diagrama de prueba.

Para el experimento se consideran varios puntos mostrados a continuación:

- Se utilizaron dos Xbee Serie 2 de DIGI international. Cada módulo equipado con una antena del tipo alambre.
- La red fue construida con tan solo dos dispositivos (coordinador y dispositivo final). Para la programación de ambos radios, el software XCTU fue utilizado en conjunto con la herramienta de prueba de rango.
- La prueba de rango demuestra la distancia real y la calidad del enlace entre dos radios en la misma red.
- Los radios se encontraban a 50 metros de distancia a una altura del suelo de 2 metros ambos visible en todo momento.

Al realizar una prueba, el sistema proporcionará una idea inicial del desempeño de los componentes. La comunicación se lleva a cabo a través de la conexión de un cable USB a la PC. Todos los nodos fueron configurados con la misma dirección personal

con una velocidad de transmisión de 9600 baudios. Al realizar los experimentos de prueba de rango se utilizó un tamaño de paquete de datos similar al que poseen las mediciones tomadas. El paquete simulado fue de 14 bytes conteniendo los valores ASCII “pH 9.42, T 24, 16:00:25” y “70 48 20 39 2E 34 32 20 2C 20 54 20 32 34 2C 20 31 36 3A 30 30 3A 32 35” en valor hexadecimal.

Todos los experimentos fueron realizados conforme a las distancias indicadas en la tabla 4.4. Los radios estaban visibles entre sí en todo momento, y las condiciones ambientales poseían una temperatura de 36 °C con una velocidad del viento de 13 km/h. Las pruebas consistieron en 100 paquetes enviados midiendo el RSSI tanto del dispositivo local como el remoto. De la misma manera, el porcentaje de recepción fue capturado (figura 5.9).

Distancia[m]	dBm Local	dBm Remoto
0	-43	-41
10	-59	-56
25	-67	-64
50	-74	-71
75	-78	-77
100	-83	-81
150	-89	-87
200	-94	-91

Tabla 5.4 Resultados de la prueba de rango.

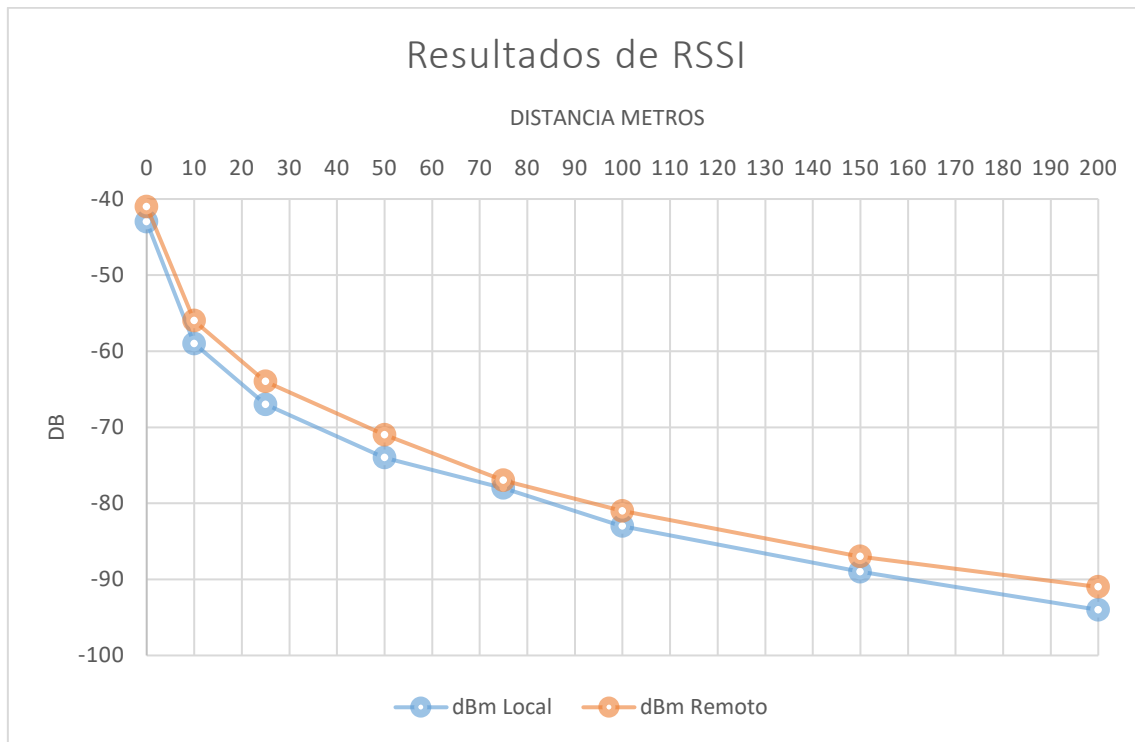


Figura 5.9 Grafica de medición de dBm.

El indicador de poder de señal recibido (RSSI por sus siglas en inglés) es la potencia de un dispositivo inalámbrico medido en – dBm del último paquete recibido (DIGI International a, 2015). Los parámetros generales se muestran en la siguiente figura.

▼ Device Selection

Select the local radio device:

	0013A20040C14401	ZigBee	API 1

Select the remote radio device:

Discovered device: 0013A20040C457A1

Specify 64-bit address:

Specify 16-bit address:

Configuration

Range Test type: Cluster ID 0x12

Packet payload:

Rx timeout (ms): 1000

Tx interval (ms): 1000

Number of packets: 100

Loop infinitely

Figura 5.10 Parámetros de configuración entre radios.

Para comenzar la prueba se deben de elegir ambos dispositivos de comunicación el local y el remoto. Una vez elegidos se selecciona el tipo de prueba de rango. La prueba de rango se realiza usando direccionado explícito de paquetes hacia el Cluster ID 0x12 en el punto final de datos el cual regresa los datos al transmisor (DIGI International d, 2015). Una vez que el proceso comienza, el software XCTU representa los datos de 3 formas.

La grafica RSSI representa los valores locales, remotos y el porcentaje de paquetes recibidos. De igual manera podemos observar el valor instantáneo de RSSI de los dispositivos local y remoto. Y finalmente, el resumen de paquetes enviados, los errores de transmisión y paquetes perdidos. A continuación, se muestra el resultado de los datos obtenidos por el software en los puntos 10, 50, 100, 150 y 200 metros respectivamente (figuras 5.11 -5.15).

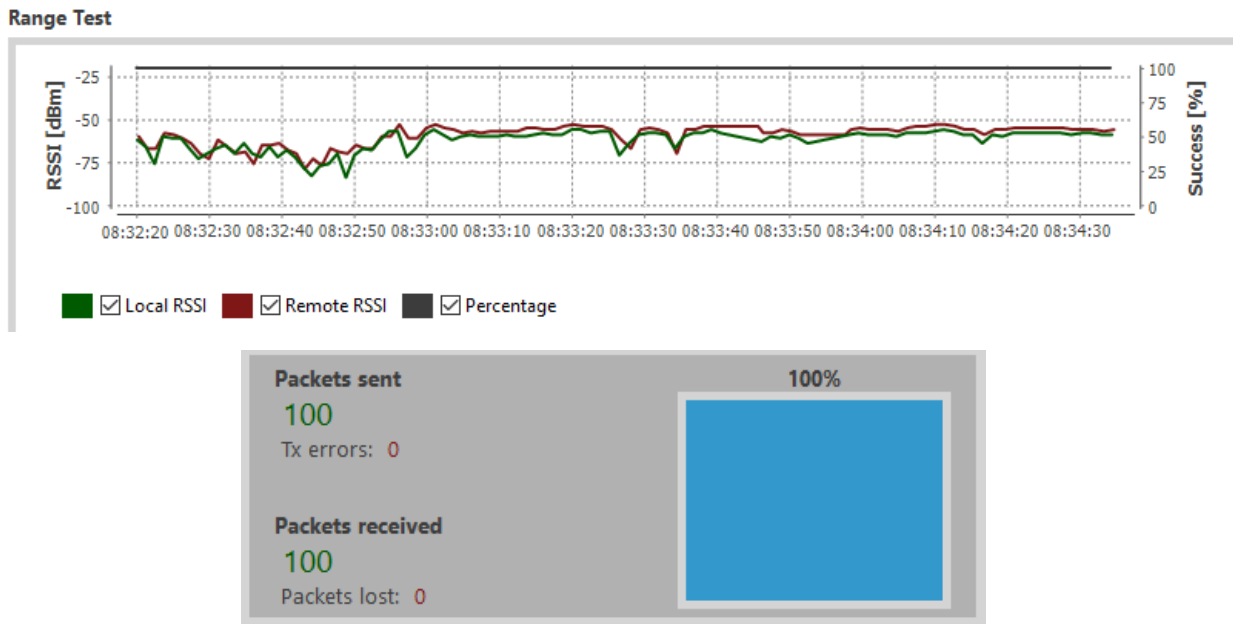


Figura 5.11 Resultado de prueba a 10m.

Range Test

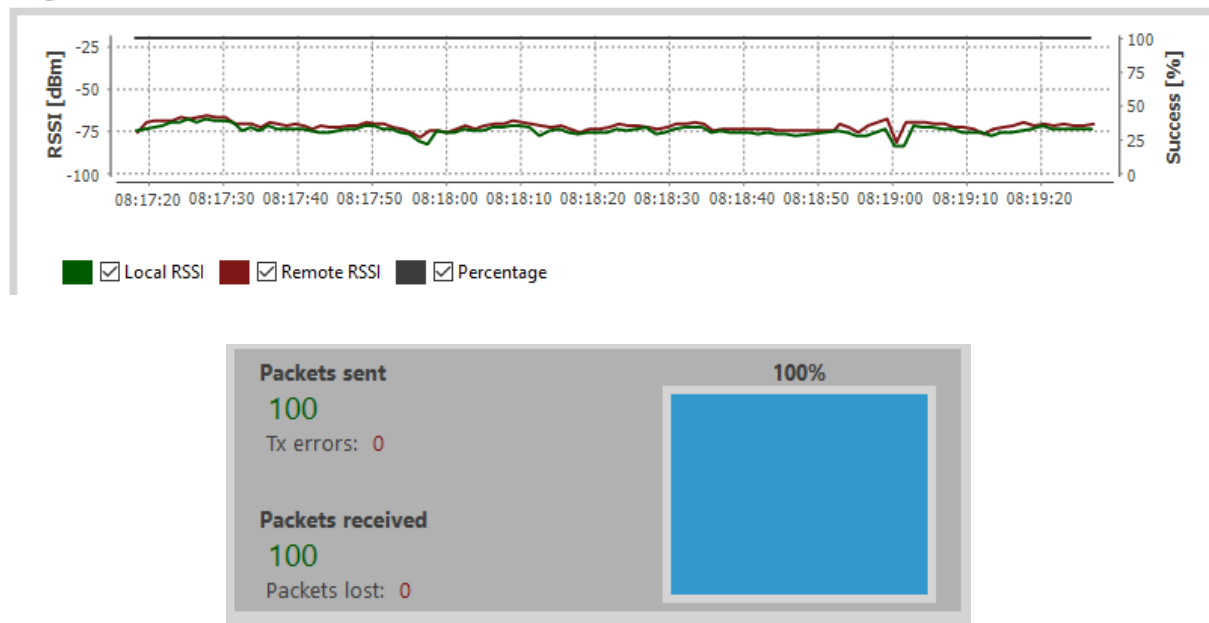


Figura 5.12 Resultado de prueba a 50m.

Range Test

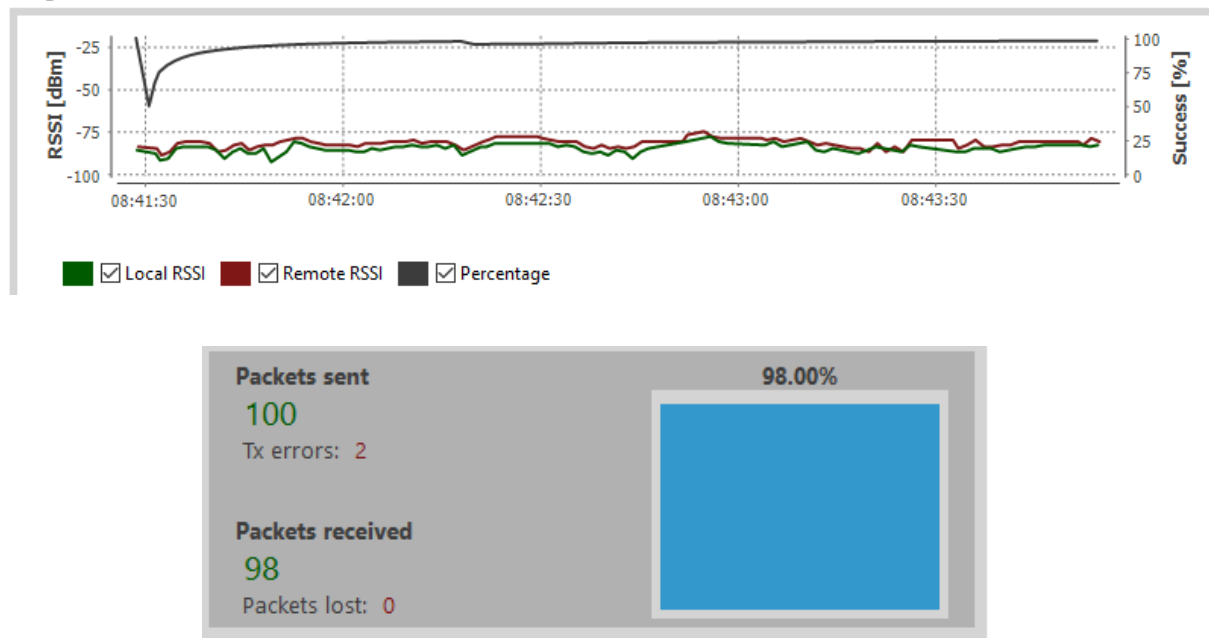


Figura 5.13 Resultado de prueba a 100m.

Range Test

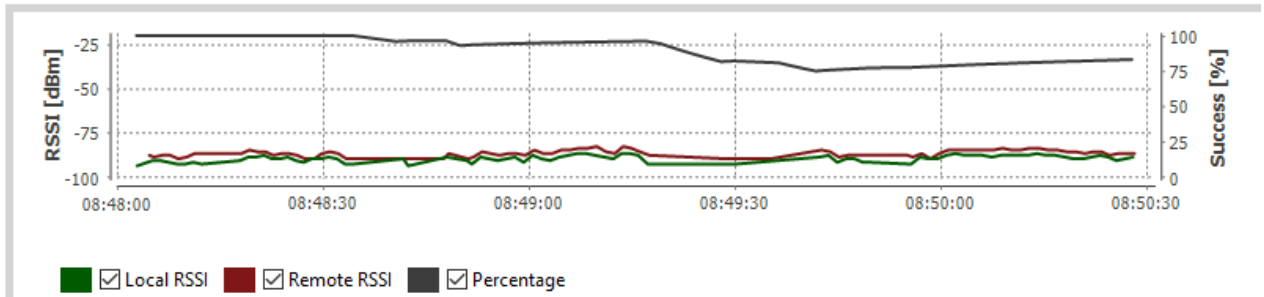


Figura 5.14 Resultado de prueba a 150m.

Range Test

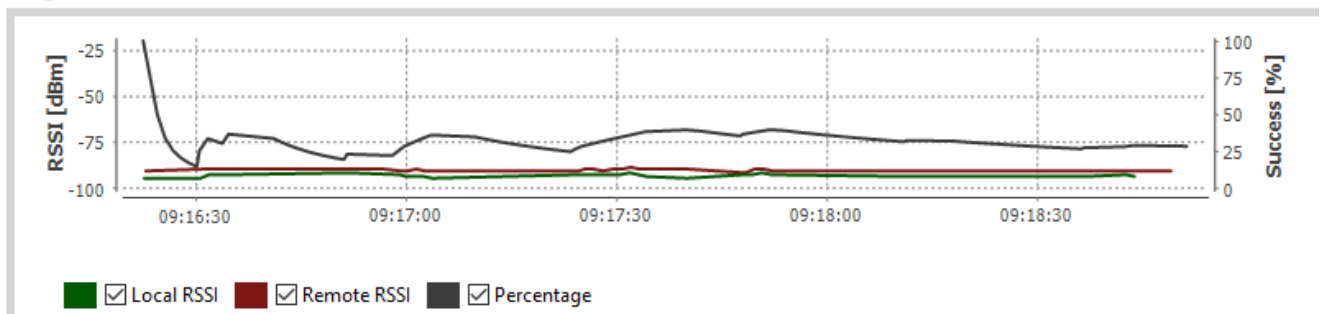


Figura 5.15 Resultado de prueba a 200m.

Como se puede observar, los resultados indican que los radios comienzan a tener error en la transmisión en el momento que se cruzan los 100 metros de distancia. Se puede

observar en las gráficas que en la distancia de 150 metros y 200 metros (figura 5.14 y 5.15) el porcentaje de paquetes recibidos cambió. Cabe mencionar que el experimento se realizó con ambos radios a la vista de uno del otro. Gracias a este experimento podemos determinar que los nodos en el sistema de medición pueden ser colocados a una distancia máxima de 100 metros siempre y cuando se encuentren en el rango de visión uno del otro.

Finalmente, la figura 5.15 muestra el resultado del experimento del monitoreo en sitio y remoto para realizar la comparación de la medición. Es importante mencionar que el tiempo de recepción de paquetes o la demora entre dispositivos que se busca depende del tamaño del paquete que es enviado (Piyare, 2013). En el caso de esta investigación el tamaño del paquete es de 14 bytes si se incluyen solamente las variables de temperatura y pH y de 20 bytes si se incluye la hora en la que fue registrada la medición.

Conforme al experimento planteado en la figura 5.8 se obtuvieron los siguientes resultados conforme a los tiempos de retardo medidos entre ambos radios. Para fines prácticos el experimento se realizó con 50 mediciones enviadas cada segundo por el sistema nodo emisor.

Los tiempos se muestran en el segundo que fue enviado el primer paquete y en el segundo que se recibió por el radio receptor. Ambos sistemas fueron configurados con sus respectivos temporizadores en 0 para iniciar al mismo tiempo la medición conforme al horario ajustado por medio del sitio *Time.is* el cual es un sitio que permite comparar la hora de un sistema con un reloj atómico (Time, 2016). Ambos relojes mostraron una desincronización similar conforme al horario mundial de 0.5 segundos. Los relojes de ambas computadoras están sincronizados con el servidor del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST por sus siglas en inglés) “time-b.nist.gov” (NIST, 2016). Los resultados de la medición y tiempos son mostrados a continuación.

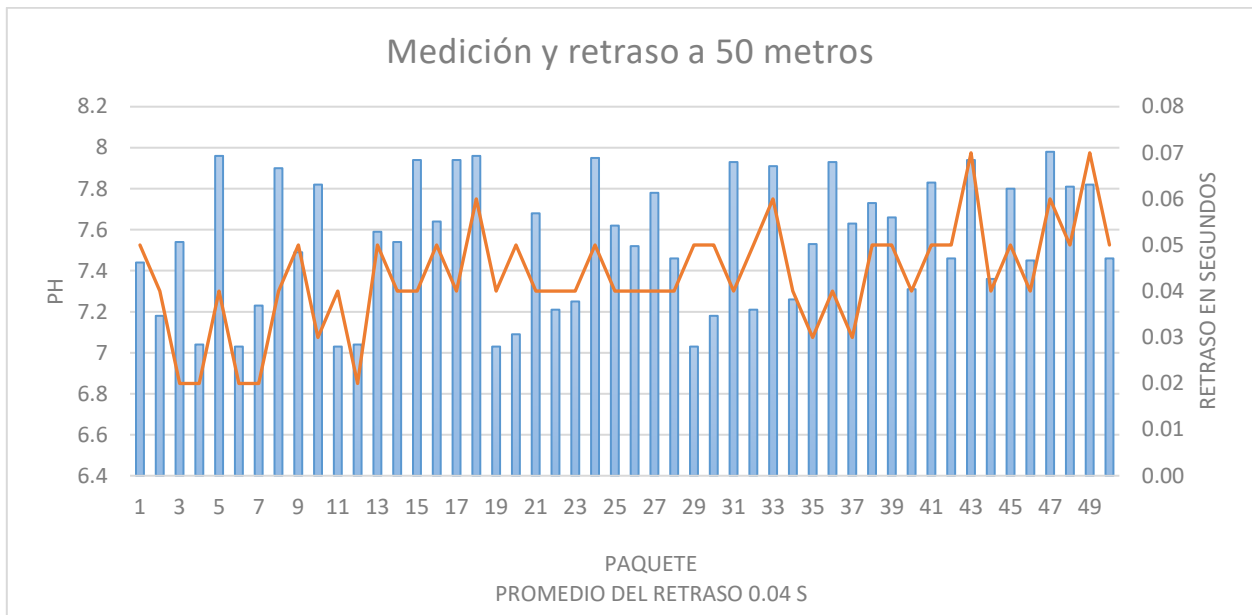


Figura 5.16 Resultado de prueba a 50m.

Como se observa en la figura 5.16 los resultados con los dispositivos a una distancia de 50 metros con ambos visibles entre ellos. Podemos concluir que aun tamaño de 20 bytes y 50 metros de distancia el tiempo de respuesta no afecta en la medición. Sin embargo, esto dependerá altamente de la aplicación del sistema. Posiblemente para la detección de eventos de la calidad del agua un tiempo de retraso de 0.04 segundos es relativamente pequeño para este tipo de aplicaciones.

6. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1 CONCLUSIONES

En esta investigación, el desarrollo y demostración de un sistema prototipo de bajo costo que monitorea el pH y la temperatura del agua a través de sensores inteligentes inalámbricos es presentado. El sistema usa sensores de bajo costo así como de licencia libres, los cuales se enfocan en proveer mediciones continuas y confiables de la calidad del agua.

Los resultados presentados demuestran que con la calibración debida, el sistema posee la capacidad de medir continuamente los parámetros de la calidad del agua y transmitirlos a una base de datos en tiempo real. El objetivo de la medición en tiempo real resulta en el potencial de incrementar la transparencia, participación y contabilidad de los recursos de agua. Finalmente, el prototipo introduce una mejora substancial comparada con el método actual de medición.

El uso de elementos de bajo costo tuvo como principal resultado la familiarización con tecnologías de medición de calidad del agua. Si bien el enfoque del proyecto es más enfocado a la tecnología, se requirieron los conocimientos necesarios para comprender las variables de medición. Un buen conocimiento de estas variables puede ayudar a predecir eventos en un futuro, por ejemplo los sucesos mencionados en el capítulo dos sobre la contaminación en México. De la misma manera, en un futuro los conocimientos de dinámica de humedales son requeridos para evaluar la calidad del agua, principalmente en humedales con agua en constante movimiento, donde la predicción de eventos sea una meta más alcanzable.

Una vez que el prototipo sea integrado con otros sensores de medición de la calidad del agua como lo son conductividad, oxígeno disuelto, turbiedad etc., el sistema puede ser usado para monitorear la calidad en un área determinada. La medición de estos

valores proporcionaría información para un análisis más detallado a eventos que se presenten. Si bien estas variables no tienen la posibilidad de detectar todos los eventos, pueden servir como sistemas de alarmas. Al mismo tiempo, agregar estas variables puede servir como trabajo a futuro para otros prototipos.

Finalmente, esta investigación demostró que con la estructura adecuada, el prototipo tiene la capacidad de ser desplegado en un sitio real más allá de las pruebas de laboratorio a las que estaba diseñado. En un futuro, métodos para optimizar el desempeño y la confiabilidad del sistema pueden ser incluidos. La instalación del sistema una vez programado es sencilla y no requiere ningún cableado. Además, este trabajo puede ser usado como la base para investigaciones en aplicaciones como por ejemplo monitoreo de redes potables, control de la calidad del riego y la conservación de reservas naturales por mencionar algunas.

6.2 RECOMENDACIONES

Las principales recomendaciones están enfocadas al ambiente empresarial y la toma de decisiones a la hora de implementar este tipo de métodos de medición. Por ello, la empresa deberá de realizar un análisis de costo beneficio del proyecto comparándolo con el método actual. Posiblemente las personas que actualmente realizan las pruebas tendrán que recibir entrenamiento adecuado para el manejo del nuevo sistema. Si no es así, se deberá de asignar a una persona calificada para continuar con el desarrollo e implementación de dicho sistema. Esto una vez que el prototipo pase a su fase de implementación.

De igual manera, la empresa deberá establecer para sus clientes un descriptivo de los alcances que posee el sistema. Estos alcances deberán de estar ajustados para adaptarse a las necesidades de varios clientes. Si bien el objetivo es el mismo, los fines de las mediciones se adaptarán a cada necesidad propuesta por el cliente. No es lo mismo un monitoreo en lugares cerrados como por ejemplo sitios industriales a un monitoreo externo como campos de riego o granjas artificiales.

Otro punto importante es la comprobación y normalización del método. Como se mencionó en el capítulo 3, la comparación con la norma puede ser un punto de partida para buscar una normalización de la medición de parámetros de calidad por medio de redes de sensores inalámbricos. Esto debido a que el tipo de medición es afectada por otras variables que se deben de buscar controlar, como por ejemplo fenómenos naturales en el caso de lugares abiertos y diferentes tipos de interferencias cuando se trata de interiores. Todo esto afectará la medición y el tiempo de respuesta a eventos que ocurran, por ello la empresa deberá de considerarlos al momento del desarrollo del proyecto.

6.3 TRABAJOS A FUTURO

El trabajo a futuro deberá enfocarse principalmente en la adición del resto de las variables de calidad del agua. Las variables de oxígeno disuelto y conductividad pueden ser utilizadas debido a su fácil integración al sistema. AtlasScientific maneja ambos dispositivos comerciales los cuales poseen la capacidad de integrarse al sistema sin ninguna modificación mayor al prototipo.

Otro punto importante a enfocarse en el sistema es el consumo de energía de cada nodo. Debido a que el consumo de energía dependerá altamente del plan de monitoreo a elegir, se deben de realizar estudios de consumo de energía ante diferentes tiempos de muestreo. Actualmente el sistema cuenta con una batería de 9V la cual tiene la única finalidad de probar el prototipo. En el futuro, podría agregarse a cada nodo una fuente de alimentación renovable propia como se muestra en la figura 6.1.

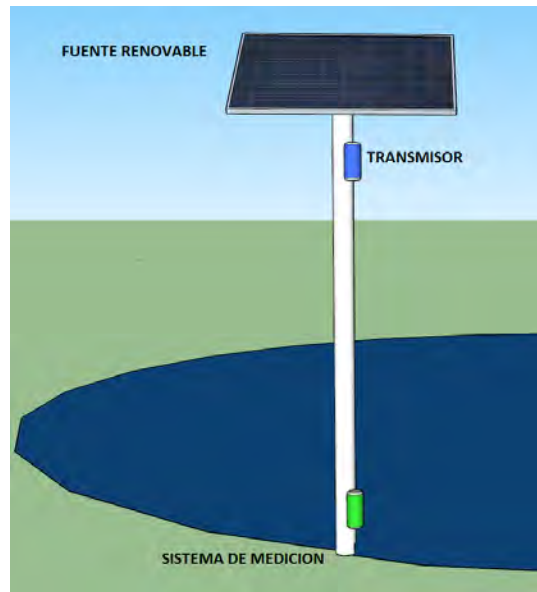


Figura 6.1 Propuesta para un sistema en sitio.

El sistema ideal estaría compuesto de una fuente renovable, el sistema transmisor, el sistema de medición y una base resistente para el montaje de las partes. Ambos sistemas de medición y transmisión deberán estar montados en estructuras que protejan contra los fenómenos naturales.

La estructura serviría de igual manera para la estación base, requiriendo un poco más de energía debido a la transmisión de datos hacia un elemento externo a la red en sitio. Esta comunicación es de alta importancia para el proyecto. En un futuro, se pueden añadir sistemas GPRS a la estación base para comunicar los datos a través de una red. El plan de monitoreo deberá estar unido al servidor web a través de una dirección IP en la computadora receptora, haciendo de la arquitectura más robusta y escalable.

La adición de todos estos elementos, tendría como resultado un sistema capaz y completo para el análisis de la calidad del agua en sitio, donde existan redes con diferentes puntos a analizar dependiendo su finalidad.

REFERENCIAS

Abbasi, T. and Abbasi, S.: Chapter 1 - Why Water-Quality Indices, In Water Quality Indices, edited by Tasneem Abbasi and S.A. Abbasi, Elsevier, Amsterdam, 2012, Pages 3-7.

Asadollahfardi, G., 2014. Water Quality Management: Assessment and Interpretation (SpringerBriefs in Water Science and Technology). 2015 Edition. Springer.

AtlasScientific b, Ezo pH Circuit, imagen digital, AtlasScientific. Disponible de: https://www.atlas-scientific.com/_images/circuit_images/ph-circuit-large.jpg. [Accesado Agosto 2015].

AtlasScientific, 2015. EZO TM class embedded pH circuit. Disponible de: https://www.atlas-scientific.com/_files/_datasheets/_circuit/pH_EZO_datasheet.pdf [Accesado Agosto 2015].

AtlasScientific, 2015. EZO TM class embedded pH circuit. Disponible de: https://www.atlas-scientific.com/_files/_datasheets/_circuit/pH_EZO_datasheet.pdf [Accesado Agosto 2015].

Babbie, E. 2010. The Practice of Social Research. 12th Edition. Cengage Wadsworth.

Bartram, J, Ballance R.: Water Quality Monitoring: A Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater Quality Studies and Monitoring Programs. London UK: World Health Organization. pp 348 (1996).

Brunn, K. Algae can function as indicators of water pollution. 2012. Disponible de: <http://www.walpa.org/waterline/june-2012/algae-can-function-as-indicators-of-water-pollution>. [Accesado 20 Septiembre 2015].

Cisneros R. Derrame en el rio Sonora: lo que sabemos y lo que no sobre el caso. 2014. Disponible de: <http://mexico.cnn.com/nacional/2014/08/28/derrame-en-el-rio-sonora-lo-que-sabemos-y-lo-que-no-sobre-el-caso>. [Accesado Noviembre 2014].

Comisión Nacional Del Agua (CONAGUA) 2010. Statistics on Water in Mexico. Mexico.

Digi International Inc a. XBee and XBee-PRO ZigBee RF Modules. 2015. Disponible de: <http://www.digi.com/products/xbee-rf-solutions/modules/xbee-zigbee#specifications>. [Accesado 20 Septiembre 2015].

Digi International Inc b. ZigBee RF Modules Xbee2, Xbeepro2 Xbee Pro S2B. Disponible de: http://ftp1.digi.com/support/documentation/90000976_W.pdf [Accesado Agosto 2015].

Digi International Inc c. ZigBee Low cost, low power, wireless networking for device monitoring and control. 2015. Disponible de: <http://www.digi.com/technology/rf-articles/wireless-zigbee>. [Accesado Septiembre 2015].

Digi International Inc d. Performing a range test. Disponible de: <https://docs.digi.com/display/WirelessConnectivityKit/Performing+a+range+test> [Accesado Agosto 2015].

Division of Environmental Health- Office of Drinking Water (DEH). 2011. Color, Taste and Odor Problems in Drinking Water. 2011. Disponible de: <http://www.doh.wa.gov/portals/1/Documents/pubs/331-286.pdf>. [Accesado Septiembre 2015].

Domingo, J., y Ashbolt, N. 2012. Fecal pollution of water. Disponible de: <http://www.eoearth.org/view/article/152739>. [Accesado Septiembre del 2015].

Faustine, A., Mvuma, A., Mong,i H., Gabriel, M., Tenge, A., Kucel., S. 2014. Wireless sensor networks for water quality monitoring and control within Lake Victoria Basin: Prototype development. Tanzania.

Florida Keys National Marine Sanctuary, (FKNMS) Disponible de: <http://floridakeys.noaa.gov/ocean/waterquality.html> [Accesado Septiembre del 2015].

Freescale Semiconductor. Miniature I2C Digital Barometer. 2013. Disponible de: http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MPL115A2.pdf. [Accesado Septiembre 2015].

Gervais-Ducouret, S., "Next smart sensors generation," in Sensors Applications Symposium (SAS), 2011 IEEE , vol., no., pp.193-196, 22-24 Feb. 2011.

Gutierrez, J., et al. IEEE 802.15.4: A developing standard for low-power, low-cost wireless personal area. 2011. IEEE Network, v 15, n 5, Septiembre/Octubre 20 pp. 12-19.

Hach Company: What is pH and how is it measured? A technical handbook for industry. Hach Company U.S.A. (2010).

Handeland, S.O., Inslund, A.K. & Stefansson, S.O., 2008. The effect of temperature and fish size on growth, feed intake, food conversion efficiency and stomach evacuation rate of Atlantic salmon post-smolts. *Aquaculture*, 283(1-4), pp.36–42. Disponible de: [http://www.webpages.uidaho.edu/fish511/Readings/temp Size growth atl salmon.pdf](http://www.webpages.uidaho.edu/fish511/Readings/temp%20Size%20growth%20atl%20salmon.pdf). [Accesado Septiembre 2015].

I2c-bus. I2C – What's that? 2014. Disponible de: <http://www.i2c-bus.org/>. [Accesado Septiembre 2015].

International Commission of Irrigation and Drainage (ICID). Mexico Profile. 2015. Disponible de: http://www.icid.org/cp_mexico.html. [Accesado Septiembre 2015].

International vocabulary of metrology. Basic and general concepts and associated terms (VIM). Edition 2008.

Jiang P., Xia H., He Z. & Wang Z., 2009. Design of Water Environment Monitoring System Based on Wireless Sensor Networks. China.

Kemker, Christine. "Water Temperature." Fundamentals of Environmental Measurements. Fondriest Environmental, Inc. 7 Feb. 2014. Disponible de: <http://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/water-temperature/>. [Accesado Septiembre 2015].

Kirianaki, N., Yurish, S., Shpak, N. y Deynega, V. 2002. Data Acquisition and Signal Processing for Smart Sensors. 1 Edition. Wiley.

Lee, M., Armeni, C., de Cendra J., Chaytor, S., Lock, S., Maslin, M., Redgwell, C., Rydin, Yvonne. 2012. Public Participation and Climate Change Infrastructure. Journal of Environmental Law Advance Access. Disponible de: <http://jel.oxfordjournals.org/> [Accesado Julio 2015].

Makinwa, K. "Smart Sensor Design," in Smart Sensor Systems, ed: John Wiley & Sons, Ltd, 2014, pp. 1-16.

Manivasakam, N. 2011. Industrial Water-Quality. 2015 Edition. Chemical Publishing Co. Inc.

Maxim Integrated. Sensor DS18B20 datasheet. 2008. Disponible de: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>. [Accesado Septiembre 2015].

McGuire, M. 2013. Chlorine Revolution: The History of Water Disinfection and the Fight to Save Lives. American Water Works Assn.

Menon, K., Divya, P., Ramesh, M. 2012. Wireless sensor network for river quality monitoring in India. India.

Merriam-Webster. Temperature definition. 2015. Disponible de: <http://www.merriam-webster.com/dictionary/temperature>. [Accesado Septiembre 2015].

MRCLAB. 2013. How to store, clean, and recondition pH electrodes. Disponible de: http://mrclab.com/media/uploads/ph_electrode_maintenance.pdf. [Accesado Septiembre 2015].

National Institute of Standards and Technology. 2016. National Institute of Standards and Technology. Disponible de: <http://nist.gov/>. [Accesado Agosto 2015].

Ntouda, J. et al., 2013. Access to drinking water and health of populations in Sub-Saharan Africa. *Comptes Rendus Biologies*, 336(5-6), pp.305–309.

NXP. 2014. I2C-bus specification and user manual. [pdf] Disponible de: http://www.nxp.com/documents/user_manual/UM10204.pdf. [Accesado Septiembre 2015].

Pechan, P. y de Vries, G. 2013. *Living with Water Targeting Quality in a Dynamic World*, New York: Springer New York.

Pertijs, M. "Calibration and Self-Calibration of Smart Sensors," in *Smart Sensor Systems*, ed: John Wiley & Sons, Ltd, 2014, pp. 17-41.

Piyare, Rajeev, 2013. Performance Analysis of XBee ZB Module Based Wireless Sensor Networks. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Volume 4, Issue 4, pp. 1615-1621.

Postolache, O. et al., 2000. *Water Quality Monitoring and Associated Distributed Measurement Systems: An Overview*.

Postolache, O., Pereira, J. y Girao, P. 2014. *Wireless sensor network-based solution for environmental monitoring water quality assessment case study*. Portugal.

Proceso. Detectan alta contaminación de organismos fecales en la Laguna de Cajititlán, 2007. Disponible de: <http://www.proceso.com.mx/?p=381778>. [Accesado Noviembre 2014].

Ramakrishnaiah, C., Sadashivaiah, C. y Ranganna G. "Assessment of Water Quality Index for the Groundwater in Tumkur Taluk, Karnataka State, India," *E-Journal of Chemistry*, vol. 6, no. 2, pp. 523-530, 2009.

Roni, P. (editor), y E. Quimby (technical editor). 2005. Monitoring stream and watershed restoration. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland.

Rubio, H., Balderrama, L., Barraza, E., Aguilar, G., y Saucedo, R. 2015. Niveles de contaminación del agua potable en la cabecera municipal de Ascensión, Chihuahua México. En: Revista Electrónica Nova Scientia. Mexico.

Rubio-Arias, H., Ochoa-Rivero, J., Quintana, R., Saucedo-Teran, R., Ortiz-Delgado, R., Rey-Burciaga, N. and Espinoza-Prieto, J. "Development of a Water Quality Index (WQI) of an Artificial Aquatic Ecosystem in Mexico," Journal of Environmental Protection, Vol. 4 No. 11, 2013, pp. 1296-1306.

SaintSmart, 2015. SainSmart UNO ATMEGA328P-PU ATMEGA8U2 Microcontroller Forfor Arduino. Disponible de: <http://www.sainsmart.com/arduino/control-boards/sainsmart-uno-atmega328p-pu-atmega8u2-microcontroller-for-arduino.html> [Accesado Agosto 2015].

Sampieri, R. 2010. Metodología De La Investigación. 5ª Edition. McGraw-Hill Interamericana.

Sánchez, O. (editor). 2007. Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México. Instituto Nacional de Ecología. México.

Saskatchewan Ministry of Environment (SME). EPB 197- Microbiological Quality: Understanding Drinking Water Quality and Management. 2012. Disponible de: <http://www.saskh20.ca/DWBinder/epb197.pdf> . [Accesado Septiembre 2015].

Shear, H, 2006. The Great Lakes, an Ecosystem Rehabilitated, But Still Under Threat. Environmental Monitoring and Assessment, February 2006, Volume 113, Issue 1, pp 199–225.

Silicon Labs, Protocol stack software, digital image, Silicon Labs, <https://www.silabs.com/SiteCollectionImages/Misc/ember-mesh-networking-supported-device.png>. [Accesado Octubre 2015].

SparkFun, 2015. Programmable Resolution 1-Wire® Digital Thermometer. Disponible de: <http://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temp/DS18B20.pdf> [Accesado Agosto 2015].

Spellerberg, I. 2005. Monitoring Ecological Change. 2 Edition. Cambridge University Press.

Sridharan, S., 2014. Water Quality System using ZigBee based Wireless sensor network. The Journal of Engineering, Science and Technology Management. Bangalore.

Sutar, K., Patil, R.2012. Wireless sensor networks system to monitor the fish farm. India.

Techmake, Sensor DS18B20, imagen digital, Techmake,. Disponible de: <http://www.techmake.com/sensor-de-temperatura-a-prueba-de-agua-ds18b20.html>. [Accesado Octubre del 2016].

Texas Instruments b. Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART). 2015. Disponible de: <http://www.ti.com/lit/ug/sprugp1/sprugp1.pdf>. [Accesado Septiembre 2015].

Texas Instruments. TMP100 and TMP101 Temperature Sensor. 2015. Disponible de: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tmp101.pdf>. [Accesado Septiembre 2015].

Time.is. 2016. Exact time for any time zone. Disponible de: <http://time.is/>. [Accesado Agosto del 2016].

United Nations development Programme. 2009. Handbook on planning, Monitoring and Evaluating for Development Results. Disponible de:

<http://web.undp.org/evaluation/handbook/documents/english/pme-handbook.pdf>
[Accesado Noviembre 2014].

US Environmental Protection Agency (EPA), 2015. Chapter 5 Water Quality Conditions, Monitoring & Assessment. Disponible de: <http://water.epa.gov/type/rsl/monitoring/vms50.cfm>. [Accesado 25 Agosto 2015].

US Environmental Protection Agency (EPA), 2015. 5.3 Water temperature. Disponible de: <http://water.epa.gov/type/rsl/monitoring/vms53.cfm>. [Accesado Agosto 2015].

Vernier. Water quality- Temperature. 2013. Disponible de: http://www2.vernier.com/sample_labs/ESV-10-COMP-water_quality_temperature.pdf. [Accesado Septiembre 2015].

Whittle, A., Allen, M., Preis, A. & Iqbal, M. 2013. Sensor networks for monitoring and control of water distribution systems. In: The 6th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure. Hong Kong.

Williamson F. et al. 2014. Online water quality monitoring in the distribution network. Water Convention at the Singapore International Water week. Singapore.

World Health Organization, 2011. Guidelines for drinking water quality 4th ed. Geneva, Suiza.

World Health Organization. Agua saneamiento y salud. 2014. Disponible de: http://www.who.int/water_sanitation_health/mdg1/es/. [Accesado Septiembre 2015].

World Meteorological Organization (WMO). Planning of Water-Quality Monitoring Systems. 2013. Disponible de: http://www.wmo.int/pages/prog/hwrrp/publications/Technical_report_series/TR-No3water_quality_monitoring_systems.pdf. [Accesado Septiembre 2015].

Yang, S. 2014. Wireless Sensor Networks (Signals and Communication Technology).
1st Edition. Springer.