



PONTIFICIA **UNIVERSIDAD CATÓLICA** DEL PERÚ

Esta obra ha sido publicada bajo la licencia Creative Commons  
Reconocimiento-No comercial-Compartir bajo la misma licencia 2.5 Perú.

Para ver una copia de dicha licencia, visite  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**DISEÑO DE UN SISTEMA INALÁMBRICO USANDO DISPOSITIVOS ZIGBEE  
PARA EL MONITOREO DE TEMPERATURA EN LA CRIANZA  
DE OVAS Y ALEVINES EN UN CENTRO DE CRIANZA**

Tesis para optar por el Título de Ingeniero Electrónico,  
que presenta el bachiller:

**Ivan Jesús Romero Suárez**

**ASESOR: Ing. Luís Ángelo Velarde**

**Lima, Abril de 2010**

## RESUMEN DE TESIS

El potencial truchícola en Junín se debe a la existencia de recursos hídricos favorables, así como un clima adecuado para las diferentes etapas de crianza. Sin embargo, esta producción al depender en su gran mayoría de la intervención humana, es propensa a efectuarse ineficientemente debido a las siguientes dos razones: Primero, se crea una discontinuidad del proceso de monitoreo ya que es necesario realizar las mediciones, estanque por estanque, produciendo un retardo en la adquisición de datos. Segundo, los distintos parámetros que involucran este proceso (temperatura, oxígeno disuelto, Ph, etc.) se monitorean de forma manual, produciendo errores que luego son reflejados en el deterioro de la calidad del agua en los estanques.

Ante esta ineficiencia, se busca usar una red de sensores que permita al usuario obtener información de los distintos parámetros involucrados. Logrando así, integrar funcionalidades que antes eran independientes unas de otras, con el fin de lograr la máxima eficiencia en el proceso.

La Tesis se desarrolla en cuatro capítulos. En el primer capítulo, se realiza un análisis de los parámetros relacionados a la crianza de ovas y alevines. En el segundo capítulo, se define una red de sensores inalámbricos y se detalla los distintos aspectos que deben ser tomados en cuenta para su diseño. En el tercer capítulo, se describe a detalle el diseño y configuración de una red inalámbrica de sensores. En el cuarto capítulo, se explica las pruebas.



A mis padres:

Por enseñarme a dar siempre lo mejor de mi.

## ÍNDICE

<b><u>INTRODUCCIÓN</u></b>		I
<b><u>CAPÍTULO 1:</u></b>	<b><u>ANÁLISIS DE LOS PARAMETROS RELACIONADOS A LA CRIANZA DE OVAS Y ALEVINES</u></b>	
1.1	PROBLEMÁTICA	01
1.2	DATOS DE LA LOCALIDAD DE ICHAHUANCA	03
1.2.1	UBICACIÓN	03
1.2.2	DATOS CLIMATOLÓGICOS	03
1.2.3	INFRAESTRUCTURA	04
1.3	VARIABLES BÁSICAS REQUERIDAS	05
1.3.1	PH	05
1.3.2	OXÍGENO DISUELTO	06
1.3.3	TEMPERATURA	06
<b><u>CAPÍTULO 2:</u></b>	<b><u>USO DE UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS</u></b>	
2.1	INTRODUCCIÓN	07
2.2	RED INALÁMBRICA DE SENSORES (WSN)	08
2.2.1	DEFINICIÓN	08
2.2.2	CARACTERÍSTICAS	09
2.2.3	ARQUITECTURA FUNCIONAL	09
2.2.3.1	AGRUPAMIENTO JERÁRQUICO	09
2.2.3.2	CONOCIMIENTO DE LA UBICACIÓN	10
2.2.3.3	NOMBRAMIENTO DE ATRIBUTO	10
2.2.4	TIPOS DE APLICACIONES	10
2.2.5	CLASIFICACIONES	11
2.3	PROTOCOLOS EN REDES INALÁMBRICAS	13

2.4	DISPOSITIVOS UTILIZADOS EN WSN	16
2.4.1	MÓDULO DE TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN	16
2.4.1.1	MAXSTREAM	16
2.4.1.2	CROSSBOW	18

### **CAPÍTULO 3: DISEÑO DE UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES USANDO DISPOSITIVOS ZIGBEE**

3.1	SISTEMA DE COMUNICACIÓN	21
3.1.1	INICIALIZACIÓN DE LA RED	22
3.1.1.1	INICIALIZACIÓN DE UN COORDINADOR	22
3.1.1.2	INICIALIZACIÓN DE UN EQUIPO TERMINAL	23
3.1.2	PROCESO DE DIRECCIONAMIENTO	23
3.1.3	PROCESO DE TRANSMISIÓN	24
3.1.3.1	TRANSMISIÓN PUNTO MULTIPUNTO	24
3.1.3.2	TRANSMISIÓN PUNTO A PUNTO	25
3.1.4	GESTIÓN DEL PUERTO IO	25
3.2	EQUIPO COORDINADOR	28
3.2.1	TRANSMISOR	29
3.2.2	PC	32
3.2.3	XCTU	32
3.2.3.1	CONFIGURACIÓN DE PC "PC SETTINGS"	32
3.2.3.2	RANGO DE TESTEO "RANGE TEST"	33
3.2.3.3	EQUIPO TERMINAL "TERMINAL"	33
3.2.3.4	CONFIGURACIÓN DE MÓDEM	34
3.3	EQUIPO TERMINAL	34
3.3.1	TRANSMISOR	35
3.3.2	SENSORES	36
3.4	ENERGÍA	37
3.5	CHASIS PARA LOS DISPOSITIVOS	39
3.6	PRECIOS	39

<b><u>CAPÍTULO 4:</u></b>	<b><u>PRUEBAS DE LA RED</u></b>	
4.1	DESCARGA DEL SOFTWARE	40
4.2	ACTUALIZACIÓN DEL FIRMWARE	41
4.3	PUNTO A PUNTO - UART	42
4.4	PUNTO MULTIPUNTO - UART	43
4.5	PUNTO MULTIPUNTO – MONITOREO IO	46
	<b><u>CONCLUSIONES</u></b>	54
	<b><u>RECOMENDACIONES</u></b>	55
	<b><u>FUENTES</u></b>	56



## INTRODUCCIÓN

El potencial de la producción de truchas en Junín se debe a la existencia de recursos hídricos favorables, así como de un clima adecuado para las diferentes etapas de la crianza. No obstante, esta producción al depender en su gran mayoría a la intervención humana, es propensa a efectuarse ineficientemente. Esto se debe a que las mediciones de los distintos parámetros que involucran este proceso se realizan de forma manual, produciendo errores que luego son reflejados en el deterioro de la calidad del agua en los estanques. A esto se le suma la discontinuidad del proceso ya que es necesario realizar las mediciones, estanque por estanque, produciendo un retardo en la adquisición de datos. Todos estos errores, en conjunto, desencadenan efectos negativos ya que alteran las variables básicas para el desarrollo óptimo de la especie. Por ejemplo: disponibilidad de oxígeno disuelto, Ph, Temperatura, Luminosidad, CO<sub>2</sub>, SST, Amonio, Nitrato, Nitrito y Cloro.

Ante esta ineficiencia, se busca usar una red de sensores que permita al usuario obtener información de los distintos parámetros involucrados. Logrando así, integrar funcionalidades que antes eran independientes unas de otras, con el fin de lograr la máxima eficiencia en el proceso.

En el mercado se puede encontrar una gran variedad de dispositivos capaces de formar redes inalámbricas. No obstante, los módulos Xbee son los que mejor se acomodan a nuestros requerimientos debido a su bajo coste y bajo consumo energético.

El objetivo de esta tesis consiste en diseñar y validar un sistema inalámbrico de sensores que permita al usuario obtener la temperatura adecuada en los distintos estanques involucrados en la crianza de ovas y alevines.

La investigación está desarrollada en cuatro capítulos. En el primer capítulo, se analiza los distintos parámetros relacionados a la crianza de ovas y alevines. Además, se explica la problemática actual para la crianza de peces.

En el segundo capítulo, se empieza definiendo una red de sensores inalámbricos. Se detalla los distintos aspectos que deben ser tomados en cuenta en el diseño de estas redes. Por ejemplo: Características, Arquitectura, Aplicaciones y Clasificaciones.

Luego, en base a comparaciones, se explica la razón por la cual se optó trabajar con el protocolo Zigbee a pesar de que existe una variedad de protocolos que podrían ser usados para establecer una comunicación inalámbrica. Por ejemplo: Wi-Fi, Wimax y Bluetooth.

Posteriormente, se explica y se compara los diferentes Módulos de transmisión y recepción que se pueden utilizar para formar redes de sensores inalámbricos.

Por ultimo, se muestra el esquema de toda la red. En la cual se observa todos los dispositivos antes mencionados, pero trabajando de una manera integral.

En el tercer capítulo, se describe a detalle el diseño y configuración de una red inalámbrica de sensores usando los dispositivos Xbee. La descripción esta centrada en tres puntos: (i) Sistema de Comunicación, (ii) Coordinador y (iii) Equipo terminal.

En el cuarto capítulo, se explica el procedimiento realizado para las pruebas con el módulo Xbee. La explicación esta centrada en cinco puntos: (i) Descarga del software X-CTU, (ii) Actualización de firmware, (iii) Punto a punto – UART, (iiii) Punto multipunto – UART y (iiii) Punto multipunto – Puertos IO.

## CAPÍTULO 1:

### ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS RELACIONADOS

#### A LA CRIANZA DE OVAS Y ALEVINES

### 1.1 Problemática

En los últimos años ha existido una insuficiencia en la producción de Trucha. Esto se debe a que la demanda de la misma ha ido incrementando y no se ha logrado mejorar el proceso de crianza para poder compensar este crecimiento. [9]

Algunos factores que dificultan alcanzar el óptimo proceso de crianza son los siguientes:

- Es esencial mantener la temperatura de los estanques dentro de un rango. Para ello, es importante contar con un Sistema que nos permite adquirir estos valores de forma fiable y eficiente. En la actualidad, el proceso de monitoreo se realiza, estanque por estanque, produciendo un retardo en la adquisición de datos.
- Monitoreo de forma manual, produciendo errores que luego son reflejados en el deterioro de la calidad del agua en los estanques. [14]

El presente estudio busca enfrentar esta problemática utilizando una red inalámbrica de sensores capaz de monitorear la temperatura en los estanques. De esta forma, mejorar el entorno en el cual se crían las ovas y alevines.

La Figura 1 ilustra un diagrama de flujo que permite visualizar el proceso que se ha estado empleando.

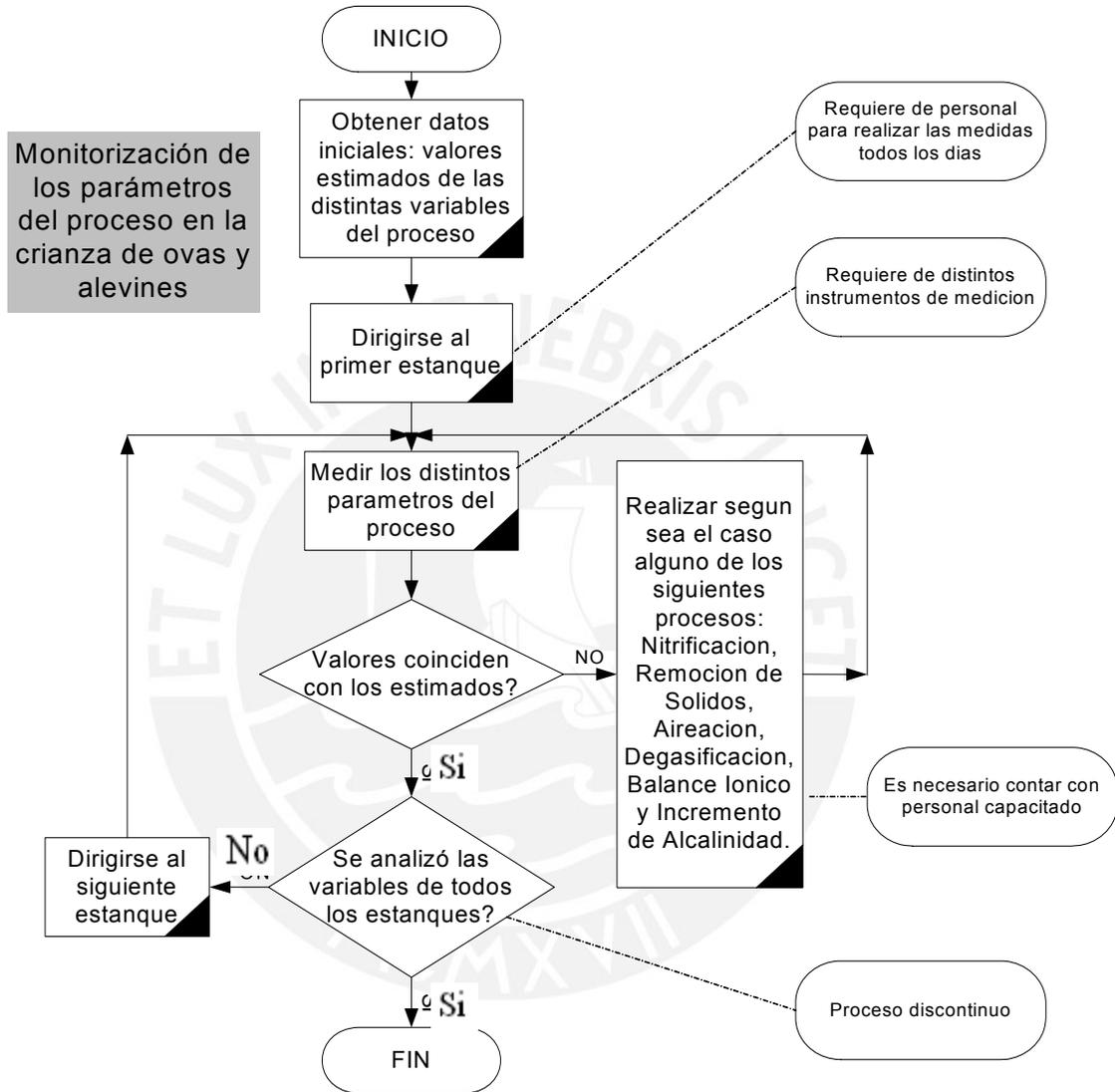


Figura 1. Proceso actual en la crianza de alevines [14]

## 1.2 Datos de la Localidad de Ichahuanca

### 1.2.1 Ubicación

El asunto de estudio se enfoca en la Comunidad de Ichahuanca. Fig2.

Departamento: Junín

Provincia: Concepción

Distrito: Comas

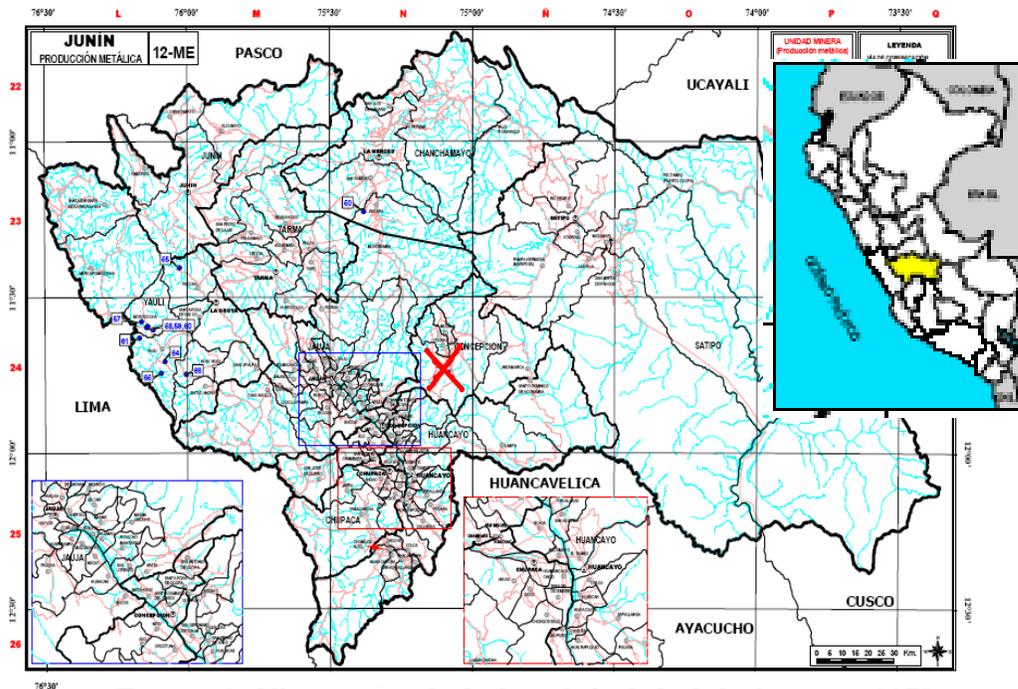


Figura 2. Ubicación de la localidad de Ichahuanca [15]

### 1.2.2 Datos Climatológicos

- Altitud de Ichahuanca: 3455 msnm
- Temperatura Máxima: De 19.50 °C a 20.50 °C

### 1.2.3 Infraestructura

Actualmente se cuenta con un terreno de 3 hectáreas donado por la Comunidad Campesina de Ichahuanca. Como se aprecia en la Figura 3.



**Figura 3. Terreno en Ichahuanca [15]**

En base a inspecciones realizadas en la zona, se confirmó la existencia de una infraestructura hidráulica como se aprecia en la Figura 4.



**Figura 4. Infraestructura hidráulica [15]**

### 1.3 Variables básicas requeridas

Como se ha mencionado anteriormente, la clave para obtener un producto de calidad es mantener dentro del rango óptimo las distintas variables básicas que componen el proceso de la crianza de ovas y alevines. Por ejemplo: Ph, disponibilidad de oxígeno disuelto, temperatura, etc.

#### 1.3.1 Ph

El Ph típicamente va de 0 a 14 en disolución acuosa, siendo ácidas las disoluciones con Ph menores a 7, y básicas las que tienen Ph mayores a 7. El Ph = 7 indica la neutralidad de la disolución (siendo el disolvente agua).

En la crianza de peces, esta variable aumenta al mediodía y disminuye en las mañanas y en las tardes. El Ph adecuado es de 7.4 [9] Figura 5.

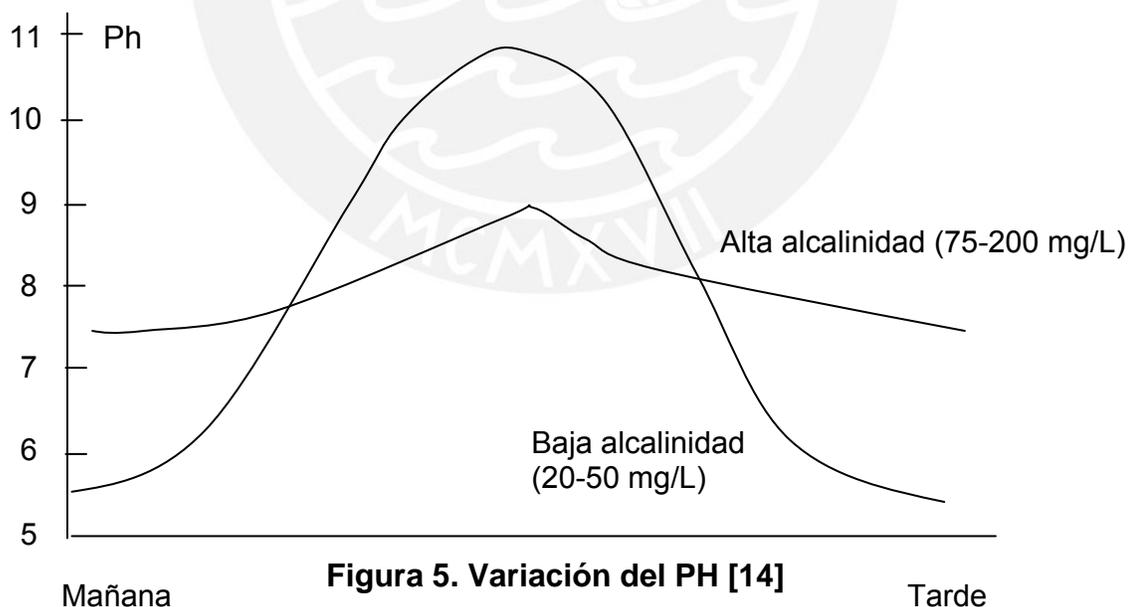


Figura 5. Variación del PH [14]

### 1.3.2 Oxígeno Disuelto

El Oxígeno Disuelto (OD) es la cantidad de oxígeno que está disuelta en el agua. Este puede ser un indicador de cuán contaminada está el agua y cuán bien puede dar soporte a la vida vegetal y animal. [9] En la tabla 1 se indica las distintas clasificaciones.

**Tabla 1. Clasificaciones del OD [14]**

Nivel de OD (ppm)	Calidad del Agua
0 – 4	Mala
4.1 – 7.9	Aceptable
8 – 12	Buena

### 1.3.3 Temperatura

La temperatura es una magnitud referida a las nociones comunes de calor o frío.

Físicamente es una magnitud escalar relacionada con la energía interna de un sistema termodinámico.

Para el asunto de estudio es recomendable mantener una temperatura próxima a 15°C. [9][14]

## CAPÍTULO 2:

### USO DE UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES

#### PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS

### 2.1 Introducción

Los sistemas de adquisición de datos han sido y serán un elemento crucial para la automatización y mejoramiento de procesos.

El diseño de estos sistemas varía en función a los requerimientos de la aplicación. Por ejemplo: capacidad de transmisión, escalabilidad, seguridad, durabilidad, cobertura, etc. [5]

Debido a los avances de las Comunicaciones en los últimos años, se ha logrado incrementar la atención en el desarrollo de redes de sensores inalámbricos de bajo costo y bajo consumo de energía.

Una red de sensores permite al usuario obtener información de los fenómenos físicos que ocurren en su entorno tales como Temperatura, Humedad, Luminosidad, Presión, Peso, Desplazamiento, etc. Por consiguiente, permite integrar funcionalidades que antes eran independientes unas de otras, con el fin de lograr máxima eficiencia en los procesos. Actualmente, las redes de sensores inalámbricos, más conocidos como “Wireless Sensor Network” (WSN), están siendo utilizadas en [1]:

- Aplicaciones Militares: Reconocimiento y ubicación del enemigo
- Monitoreo Ambiental: Detección de incendios
- Prevención Medica: Detección de virus
- Domótica: Control de procesos en el hogar
- Acuicultura: Control en la crianza de peces

El presente capítulo empieza definiendo una red de sensores inalámbricos. Además, se detalla los distintos aspectos que deben ser tomados en cuenta en su diseño. Luego, en base a comparaciones, se explica la razón por la cual se optó trabajar con el protocolo Zigbee a pesar de la variedad de protocolos existentes actualmente. Por ejemplo: Wi-Fi, Wimax y Bluetooth. Por último, se explica y se compara los diferentes Módulos de transmisión y recepción que se puede utilizar para formar redes de sensores inalámbricos.

## 2.2 Red Inalámbrica de Sensores (WSN)

### 2.2.1 Definición

Red inalámbrica con numerosos sensores o motas distribuidas espacialmente para visualizar distintos fenómenos físicos. Entre ellos temperatura, sonido, vibración, desplazamiento, etc. [1][5]

Estos tipos de redes están concebidas para aplicaciones en las cuales no se cuenta con una infraestructura cableada, ni para el suministro energético, ni para el de datos. Por ello, es necesario que los nodos funcionen con pequeñas fuentes de energía y que se comuniquen por medio de canales inalámbricos.

Otro requisito importante es la capacidad de procesamiento distribuido debido a que la transmisión de datos es el principal consumidor de energía. De esta manera, se logra procesar la mayor cantidad de información localmente, para minimizar el número de bits transmitidos. [1][5]

## 2.2.2 Características

- Topologías Dinámicas: Un WSN debe adaptarse ante cambios en la Red. Normalmente, se hace mención al movimiento de los nodos.
- No se utiliza una infraestructura de red: Esto es posible ya que los nodos pueden operar de emisores, receptores y enrutadores.
- Tolerancia a errores: Un nodo dentro de la red debe ser capaz de mantener su funcionamiento a pesar de errores en el sistema.
- Comunicaciones multisalto o broadcast: Es necesario que la red cuente con un protocolo que permita comunicaciones “multi-hop”.
- Bajo consumo energético: Es uno de los factores más sensibles debido a que dependen de baterías para su funcionamiento.
- Limitaciones de Hardware: Con el fin de ahorrar energía, el hardware debe ser lo más sencillo posible. Esto nos limita a tener una capacidad de procesamiento limitada.
- Costo de producción: Normalmente económicos. [2][5].

## 2.2.3 Arquitectura Funcional

A diferencia de las distribuciones convencionales donde la información recolectada por cada nodo (sensor) es un atributo inherente a este; las redes de sensores agrupan la información de los sensores y le asignan un nombre de referencia para acceder a ella. Estas prestaciones trajeron consigo algunas complicaciones a la hora de usar aplicaciones que requerían la ubicación exacta de cada sensor.

Podemos destacar 3 tareas importantes:

2.2.3.1 Agrupamiento jerárquico. Para permitir operaciones escalables en una red de sensores, los nodos son agrupados en función a su proximidad y energía. Estos grupos (“Cluster”) podrían ser agrupados jerárquicamente para

lograr operaciones aún más complejas. Dentro de esta jerarquía existe un cluster principal que se encarga de filtrar la información obtenida y proveer información procesada como por ejemplo el promedio de las temperaturas obtenidas dentro de un área.

En caso de que el cluster principal falle o esté bajo de energía se reiniciaría el proceso de agrupamiento. [1][5]

2.2.3.2 Conocimiento de la ubicación. Debido a que los sensores operan en un ambiente físico, en algunas aplicaciones es necesario saber su posicionamiento real. Este tipo de información puede ser obtenida por medio de varios métodos. Sistema de posicionamiento global (GPS) es uno de los métodos que provee ubicación exacta del objeto a analizar, pero por razones económicas esta tecnología sólo puede ser usada en algunos sensores.

Otro método utilizado es el óptico. Este provee información de alta precisión y resolución del objeto a analizar, pero sólo es efectivo en áreas pequeñas. [1][5]

2.2.3.3 Nombramiento de atributo. Debido a la alta cantidad de sensores en una red, es poco práctico prestarle atención a cada uno por separado. Los usuarios estarían más interesados en saber la temperatura más alta en un determinado sector que saber la temperatura de todos los sensores en la red. El nombramiento de atributo facilita el agrupamiento de la información para aplicaciones de petición [5].

## 2.2.4 Tipos de Aplicaciones

En base a las características de operación que posee una aplicación en una red de sensores, estas pueden ser divididas en 2 clases: petición (“querying”) o tarea (“task”).

Las aplicaciones de petición se enfocan en cómo la información recolectada por una red de sensores es recuperada basándose en un criterio específico. Por

ejemplo, si se quisiera saber dentro de una región sensada cual es la mayor temperatura, bastaría un filtrado de todos los datos obtenidos dentro de la red. De este modo, el usuario no recibe toda la trama de datos produciendo un mal uso de los recursos del sistema tales como el nivel de energía y el ancho de banda. También se puede realizar peticiones para obtener información del estado del sensor; como la energía restante, estado de operación y un listado de los sensores del mismo vecindario. [2][5]

Por otro lado, se tiene las aplicaciones de tarea que incluye la programación del nodo para realizar ciertas acciones ante eventos predeterminados. Estos eventos pueden ser cambios ambientales, mensajes de sensores vecinos, etc. Una tarea sencilla sería pedir a cada sensor que reportase cada vez que sense un acontecimiento extraño. Una tarea más compleja requeriría la colaboración de otros nodos para alcanzar un funcionamiento más eficiente. Por ejemplo, el sensado de un objeto en movimiento dentro de un área se podría realizar haciendo un monitoreo constante por parte de los sensores involucrados aunque esto representase un uso ineficiente de la energía. En cambio, si esta labor se realizara en coordinación, se podría obtener información más valiosa usando eficientemente los recursos del sistema. [2][5]

### 2.2.5 Clasificaciones

Los WSN pueden ser clasificados en función a las prestaciones que deben cumplir para una determinada aplicación.

En función a la distancia que existe entre el sensor y la Estación Base, los WSNs pueden ser “Single-hop” (también conocidos como sin propagación) o “Multihop” (con propagación). Para el caso de un “Single-hop”, todos los sensores transmiten directamente hacia la estación base, mientras que en “Multihop”, algunos sensores pueden enviar la información a la estación base

por medio de otros sensores. En este último caso, los nodos intermedios cumplen la función de enrutadores.

Las Redes “Single-hop” poseen una estructura más simple y son usados para realizar aplicaciones de sensado de áreas reducidas. En cambio, las redes “multihop” permiten realizar aplicaciones más complejas sacrificando la sencillez del sistema.

Basado en la densidad en cada nodo y en la dependencia de la información, las WSNs pueden ser clasificadas como “aggregating” y “nonaggregating”. En los sistemas “nonaggregating”, la información proveniente de cada nodo es enviada al destinatario tal como llegó. Esto permite que el hardware usado en los nodos sea sencillo debido a la poca necesidad de procesamiento computacional. No obstante, el tráfico total del sistema aumentará rápidamente con el crecimiento de la red produciendo un aumento de energía consumida. Por otro lado, los sistemas “aggregating” agregan funciones que pueden ser ejecutadas en nodos intermedios logrando así eliminar información redundante. [5]

En consecuencia, el tráfico en el sistema se reduciría considerablemente y se lograría ahorrar energía en la transmisión de la información. No obstante, al tener que realizar funciones en los nodos intermedios es necesaria una capacidad de procesamiento y una mayor memoria en los nodos.

Basado en la distribución de los sensores, los WSN pueden ser determinísticos o dinámicos. Para el caso de sistemas determinísticos, la posición de los sensores es planificada con anticipación. El control de estos sistemas es simple y su instalación también. En el caso que se tuviera que lidiar con sensores distribuidos aleatoriamente en un área, sería necesario un sistema dinámico. Este esquema es más escalable, pero requiere de algoritmos de control más sofisticados.

Si nos enfocamos en el esquema de control, las WSN pueden ser Auto configurables o No auto configurables. En los sistemas No auto configurables, los sensores no son capaces de organizarse por si mismos, por lo que cuentan con un controlador central, al cual le envían información con el fin de recibir comandos a realizar. Este esquema es usado en redes pequeñas. Por otro lado, en los sistemas Auto configurables, los sensores son capaces de establecer y mantener una comunicación por ellos mismos. Este esquema encaja para redes amplias que requieran realizar tareas de monitoreo [5].

En la tabla 2 se muestra una síntesis de lo antes mencionado:

**Tabla 2. Clasificación de una WSN**

Factores	Grupos
Distancia hacia la estación base	Single-hop vs. Multihop
Dependencia de la información	Nonaggregating vs. Aggregating
Distribución de los sensores	Deterministicos vs. Dinámicos
Esquema de Control	Auto Configurables vs. No Auto Configurables

### 2.3 Protocolos en redes Inalámbricas

Es importante conocer los protocolos más usados en la actualidad para formar redes inalámbricas y de esta forma entender en que aplicaciones es recomendable usar el protocolo Zigbee.

En los últimos años, el acceso a Internet era muy complicado en algunas zonas. Ante esto, surgió el protocolo Wimax que busca facilitar el acceso a Internet a zonas donde el cableado era muy caro o no llegaba. Este protocolo trabaja bajo el estándar IEEE 802.16 que proporciona accesos concurrentes en áreas de hasta 48 Kilómetros de radio y a velocidades de hasta 70Mbps. [2]

Dentro de esta tecnología podemos encontrar diferentes estándares. Algunos ejemplos son el IEEE 802.16d que sólo trabaja con terminales que se encuentran en un punto fijo y el IEEE 802.16e que permite acceso a terminales que se encuentran en movimiento.

Por otro lado, tenemos las redes Wi-Fi que permiten aplicaciones en la que se requiera conectar un equipo a Internet o simplemente crear redes locales para intercambiar información entre 2 o más dispositivos. Estas redes LANs pueden estar conformadas hasta por 32 dispositivos

Este protocolo permite intercambiar grandes cantidades de información como es el caso del estándar IEEE 802.11g que alcanza los 54Mbps. Esto conlleva a que dispositivos de alto tráfico, como las computadoras personales, utilicen Wi-Fi para transmitir sus datos [7].

No obstante, existen aplicaciones, como WSN, en la que se requiere redes que sean capaces de sacrificar algunos recursos del sistema como es el Ancho de Banda; con el fin de minimizar la energía consumida por los dispositivos que la componen. Tal es el caso de las redes que usan los protocolos Bluetooth y Zigbee.

Las redes basadas en el protocolo Bluetooth, a comparación de las que usan Wi-Fi y Wimax, busca crear redes de área personal donde la cobertura alcanza un rango aproximado de 10 m. Sin embargo, se puede llegar hasta un alcance de 100 metros sacrificando considerablemente el consumo energético. [3]

Para este tipo de tecnología tenemos el estándar IEEE 802.15.1 que es capaz de alcanzar los 720Kbps. Esto se debe a que las redes que usan este tipo de protocolo poseen dispositivos que no necesitan transmitir grandes volúmenes de datos. Por ejemplo, comunicación del mouse o de la impresora con la PC. [3]

En cuanto a la capacidad interna de la red, la tecnología Bluetooth sólo nos permite un máximo de 7 dispositivos (nodos).

Las redes basadas en el protocolo Zigbee, en similitud con las que usan Bluetooth, son tecnologías inalámbricas de área personal que buscan un ahorro de energía sacrificando otros recursos del sistema como es el Ancho de Banda.

Comparando los distintos grados de ahorro de energía entre estas 2 últimas tecnologías, Zigbee tendría un menor consumo energético. Esto se debe a que el sistema Zigbee permanece la mayor parte del tiempo dormido, mientras que en una comunicación Bluetooth siempre se está transmitiendo o recibiendo [2][8].

Para este tipo de tecnología se usa el estándar IEEE 802.15.4 que puede transmitir hasta 250Kbps. Por ejemplo, redes de sensores. A diferencia de Wi-Fi que permite un máximo de 32 nodos y de Bluetooth que permite un máximo de 7 nodos, Zigbee permite la creación de redes de hasta 65000 nodos.

**Tabla 3. Comparación entre protocolos inalámbricos**

Estándar	WI-FI (802.16)	Wimax (802.11)	Bluetooth (802.15.1)	Zigbee (802.15.4)
Aplicación Principal	WLAN	WMAN	WPAN (sustituir cable entre 2 dispositivos).	WPAN (control y monitorización)
Vida de Batería (días)	0.5 - 5	-	1 - 7	100 – 1000+
Tamaño Red (nodos)	32	escalable	7	65000
Velocidad (Kbps)	54Mbps	70Mbps	720Kbps	20 – 250 Kbps
Cobertura (metros)	100	74000	10	1 - 100
Parámetros más importantes	Velocidad y flexibilidad	Velocidad y flexibilidad	Coste y perfiles de aplicación	Fiabilidad, bajo consumo y bajo coste

Todo esto, lo convierte en el protocolo óptimo para el asunto de estudio. En la tabla 3 se presenta la síntesis de lo explicado anteriormente.

## 2.4 Dispositivos utilizados en WSN

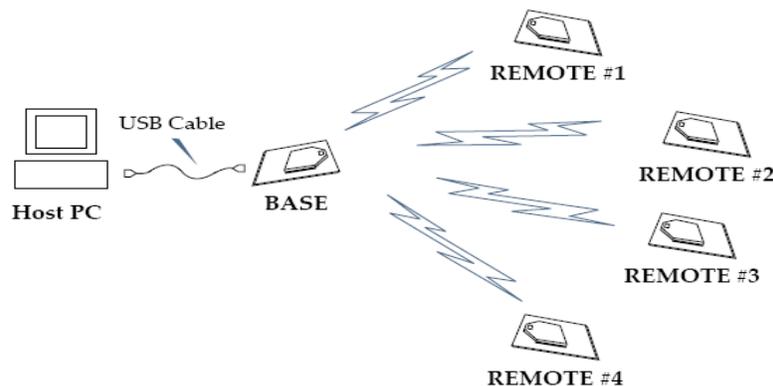
### 2.4.1 Módulo de transmisión y Recepción

El equipo de transmisión y recepción es crucial para formar WSN. A continuación se explican los equipos de MaxStream y de Crossbow.

#### 2.4.1.1 MaxStream

La Familia XBee con módulos RF basados en el estándar IEEE 802.15.4/ZigBee garantizan una comunicación inalámbrica de alta performance y de bajo consumo energético. Entre estos dispositivos se puede destacar el Xbee y el Xbee -Pro.

Estos módulos brindan la facilidad de recibir información por medio del puerto serial o por sus puertos analógicos (los cuales son conectados a sensores). Esta información es enviada inalámbricamente a otros Módulos RF y así sucesivamente formando una red de sensores. Se presenta un ejemplo de una configuración punto – multipunto, donde la información recolectada de los sensores es enviada a una PC. Figura 6.



**Figura 6. Configuración Punto – Multipunto [12]**

En la tabla 4 se presenta un cuadro comparativo con las distintas prestaciones del Xbee y del Xbee-Pro.

**Tabla 4. Diferencias entre el Xbee y el Xbee-Pro [12]**

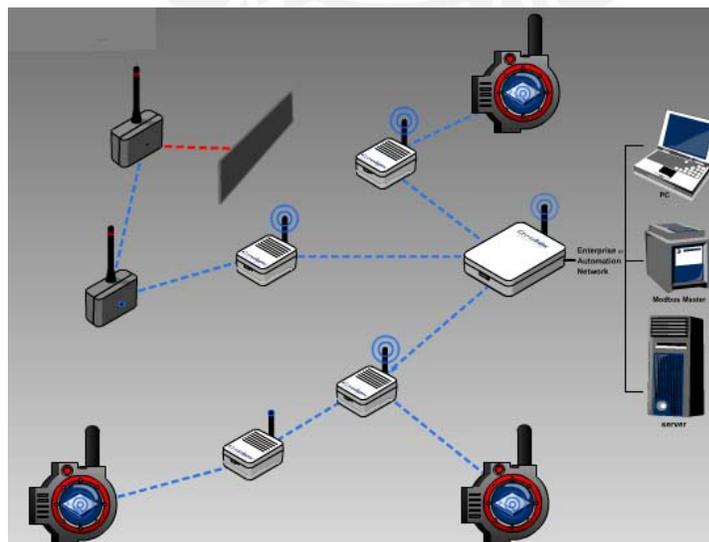
			
Rendimiento	Ambientes interiores	Hasta 30m	Hasta 100m
	Ambientes exteriores	Hasta 100m	Hasta 1200 m
	Potencia de Salida	1 mW (0 dBm)	60 mW (18 dBm)
	Velocidad	250 Kbps	250 Kbps
Requerimiento de Potencia	Suministro de Voltaje	2.8 – 3.4 V	2.8 – 3.4 V
Información General	Frecuencia	ISM 2.4 GHz	ISM 2.4 GHz
	Dimensiones	2.438 cm * 2.761 cm	2.438 cm * 3.294 cm
	Temperatura de Operación	-40 a 85 C	-40 a 85 C
Trabajo en Red	Topologías permitidas	Punto a Punto, Punto a Multipunto y Mesh	Punto a Punto, Punto a Multipunto y Mesh
	Número de canales	16 canales de secuencia directa	12 canales de secuencia directa

### 2.4.1.2 Crossbow

La tecnología de Crossbow se encuentra continuamente presentando las últimas innovaciones en lo que concierne a redes de sensores inalámbricos. Presenta aplicaciones para: optimizar el ahorro de energía en la transmisión, capacidad de programación en línea, así como la capacidad de auto ruteo para evitar la pérdida de un nodo por obstáculos no previstos en la línea de transmisión. En la figura 7 se muestra como se forma estos tipos de redes.

Estos dispositivos contienen un conector de 51 pines que les permite comunicarse con otros dispositivos por medio de puertos analógicos, I/O Digitales, I2C y UART. Entre estos dispositivos podemos destacar al IRIS y al MICAz.

A comparación de los dispositivos MaxStream, Crossbow cuenta con una serie de sensores que son fácilmente conectados al transmisor por medio de sus 51 pines. [13]



**Figura 7. Redes usando dispositivos Crossbow [13]**

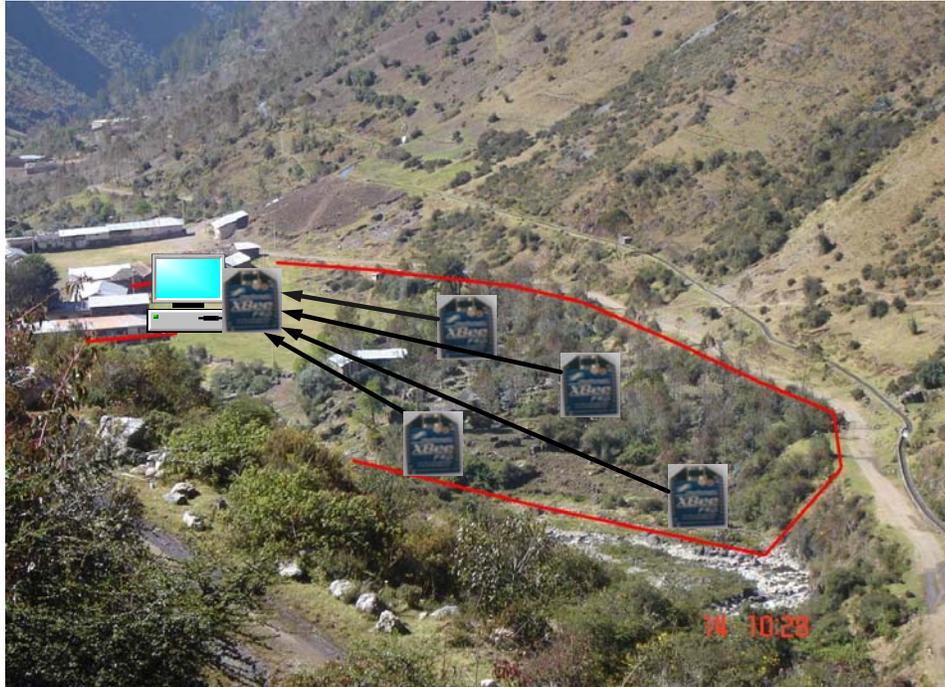
En la tabla 5 se presenta un cuadro comparativo con las distintas prestaciones de estos dispositivos.

**Tabla 5. Diferencias entre el Iris y el Mica [13]**

		
Interfaces	I/O Digital, I2C y SPI	I/O Digital, I2C y SPI
Frecuencia	ISM 2.4 GHz	ISM 2.4 GHz
Potencia de Salida	3 dBm	0 dBm
Ambientes Interiores	50 m	30 m
Ambientes Exteriores	300 m	100 m
Velocidad	250 Kbps	250 Kbps
Suministro de Voltaje	2.7 V – 3.3 V	2.7 V – 3.3 V
Batería	2X AA	2X AA
Dimensiones	58 * 32 * 7 mm	58 * 32 * 7 mm
Peso	18 g	18g

### CAPÍTULO 3:

## DISEÑO DE UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES USANDO DISPOSITIVOS ZIGBEE



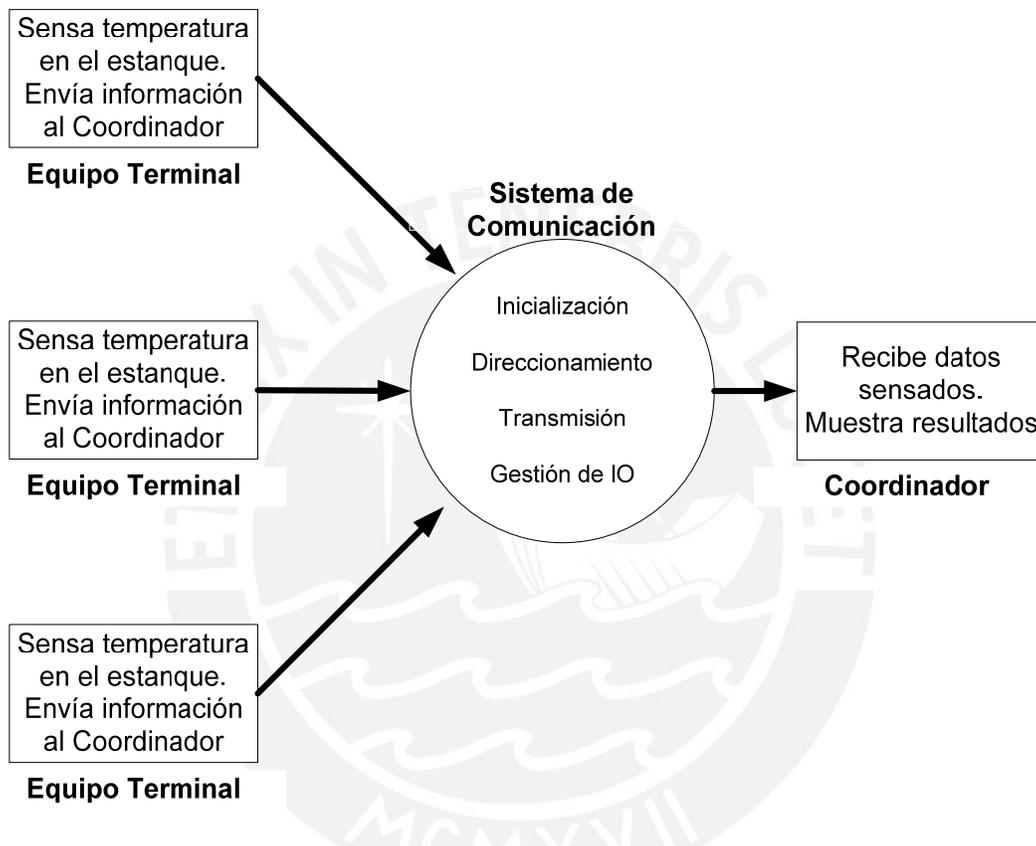
**Figura 8. Terreno donado en Ichahuanca [15]**

El objetivo de esta tesis consiste en diseñar un sistema inalámbrico de sensores que permitirá monitorear la temperatura en los estanques para el proceso de crianza de ovas y alevines. Para lograrlo, es importante poseer un dispositivo Zigbee por cada estanque. Además, se contará con un sensor de temperatura que irá conectado a cada dispositivo Zigbee.

Los módulos Xbee son los que mejor se acomodan a nuestros requerimientos debido a su bajo costo y bajo consumo energético. En la figura 8 se muestra el terreno donde será implementada la red inalámbrica.

En el presente capítulo, se describe a detalle el diseño y configuración de una red inalámbrica de sensores usando los dispositivos Xbee. La descripción esta

centrada en tres puntos: (i) Sistema de Comunicación, (ii) Coordinador y (iii) Equipo terminal. En la figura 9 podemos visualizar un diagrama esquemático que refleja la dependencia entre los tres puntos antes mencionados.



**Figura 9. Diagrama esquemático de una red inalámbrica de sensores**

### 3.1 Sistema de Comunicación

Un Sistema de Comunicación hace referencia al protocolo que gobierna la transferencia de datos entre los dispositivos de red. En el presente estudio se usa el protocolo Zigbee [16].

Las redes Zigbee pueden operar en modo punto a punto, punto multipunto y mesh [22]. Adicionalmente, los dispositivos Xbee añaden puertos digitales y analógicos. Para establecer el modo de operación y que recursos se desean utilizar se debe configurar los parámetros del dispositivo usando el programa XCTU [17].

En la presente sección, se describe a detalle los distintos procesos involucrados en una comunicación inalámbrica utilizando los dispositivos Xbee. Además, se explica los parámetros del programa XCTU para configurar la red. El estudio se centra en cuatro puntos: (i) Inicialización de red, (ii) Proceso de direccionamiento, (iii) Proceso de transmisión y (iiii) Gestión del puerto IO.

### 3.1.1 Inicialización de la Red

Los transmisores que se van a utilizar, Xbee, trabajan bajo el protocolo Zigbee. Estos son utilizados para formar redes de Área Personal (PAN) que están constituidos por un Coordinador y equipos terminales [16] [22].

A continuación se explica el proceso que se debe seguir para configurar los distintos equipos de una red Zigbee. Para esto se utilizan los siguientes comandos AT: SC (“Scan Channels”), ID (“Pan ID”), SD (“Scan Duration”) y NJ (“Node Join Time”) [17].

#### 3.1.1.1 Inicialización de un Coordinador (C)

Para formar una red, el Coordinador selecciona un canal, que no esté siendo utilizado de los 16 canales disponibles, y elige un identificador de red (ID). Esto es posible ya que el Coordinador realiza un monitoreo de la energía utilizada en cada uno de los canales (SC) durante un período establecido por el parámetro

SD. Si se elige un valor de ID igual a 0xFFFF, el coordinador obtendrá el ID final de forma aleatoria [17].

Una vez inicializado el Coordinador, permitirá a otros transmisores unirse a la red por medio de él durante un periodo establecido (NJ). El dispositivo cuenta con un terminal (pin 15 – D5) que oscilará a una frecuencia de 1Hz para notificar al usuario que la inicialización fue satisfactoria [17].

### 3.1.1.2 Inicialización de un Equipo Terminal (E)

Antes de que un equipo terminal pueda pertenecer a una red, éste debe localizar a un coordinador que ya haya sido asociado a una PAN. Para lograr esto, el equipo terminal envía un llamado a todos los canales. En función a la respuesta que obtenga decidirá a que canal unirse. Si el ID es igual a 0xFFFF, el equipo terminal se unirá a la primera PAN que encuentre. Si no fuese el caso, sólo se unirá a la red que tenga la misma ID especificada.

El dispositivo cuenta con un terminal (pin 15 – D5) que oscilará a una frecuencia de 0.5Hz para notificar al usuario que la inicialización fue satisfactoria [17].

### 3.1.2 **Proceso de direccionamiento**

Todos los módulos Xbee son identificados con una única dirección de 64 bits o con una cadena ASCII. La dirección de 64 bits puede ser leída con los comandos SH y SL. La cadena ASCII puede ser configurada con el comando NI.

Para enviar información a un nodo usando su dirección de 64 bits se debe configurar este valor en los comandos DH y DL del equipo transmisor. Ya que estos módulos operan bajo el protocolo Zigbee, el proceso de ruteo debe

realizarse con direcciones de 16 bits. Para esto, las direcciones de 64 bits deben ser convertidas a direcciones de 16 bits. Si un módulo no conoce los 16 bits asociados a una dirección de 64 bits, este realizará el proceso de Descubrimiento de dirección [17].

En caso que se desee enviar información a un nodo usando su cadena ASCII, se deberá ejecutar el comando DN. Este comando configurará automáticamente los parámetros DH y DL en el equipo que desee transmitir. Al igual que en la transmisión usando los 64 bits, se realizará el proceso de Descubrimiento de dirección para obtener los 16 bits asociados.

En ambos casos, es importante saber la ruta que seguirá el paquete para llegar desde la fuente al destino. En caso de no conocerse, se realizará el proceso de Descubrimiento de ruta que es basado en el algoritmo de ruteo AODV (“Ad-hoc On-demand Distance Vector”) [17].

### 3.1.3 Proceso de transmisión

Los equipos Xbee son capaces de soportar topologías punto a punto y punto multipunto. A continuación explicaremos como los equipos Xbee trabajan en cada modo de transmisión [16] [18].

#### 3.1.3.1 Transmisión Punto Multipunto

Este modo de transmisión permite que la información enviada sea recepcionada por todos los nodos que componen la red.

Para poder operar en este modo de transmisión se debe configurar los siguientes comandos con los valores indicados [17] [22].

DL (“Destination Low Address”) = 0x0000FFFF

DH (“Destination High Address”) = 0x00000000

### 3.1.3.2 Transmisión Punto a punto

Para este tipo de transmisión es necesario especificar la dirección de 64 bits o la cadena ASCII del dispositivo al que se desea enviar la información. Este proceso fue explicado en el proceso de direccionamiento.

Un caso específico es cuando se desea enviar información al Coordinador. Para ello se debe configurar los siguientes comandos con los valores indicados [17] [22].

DL (“Destination Low Address”) = 0

DH (“Destination High Address”) = 0

### 3.1.4 **Gestión del Puerto IO**

Los módulos Xbee soportan entradas analógicas y digitales. Cada módulo posee 4 pines analógicos y 10 pines digitales. En tabla 6 podemos ver los distintos comandos usados para configurar el modo de operación de los puertos del módulo Xbee.

Para lograr recibir datos IO de los equipos terminales en el Coordinador, se debe habilitar las entradas que se deseen monitorear en los equipos terminales. Además, los comandos DH y DL deben ser igual a 0 para que todos los valores sensados se envíen al Coordinador. Para configurar la frecuencia de muestreo se debe usar el comando IR, el cuál será explicado en el Capítulo 4.

**Tabla 6. Comandos para configurar el modo de operación del Xbee [17]**

Modo de operación	Comandos
CD / DIO12	P2
PWM0 / RSSI / DIO10	P0
PWM / DIO11	P1
Sleep_RQ	Configuración no soportada
DIO4	D4
CTS / GPIO7	D7
ON_Sleep	Configuración no soportada
ASSOC / DIO5	D5
RTS / DIO6	D6
AD3 / DIO3	D3
AD2 / DIO2	D2
AD1 / DIO1	D1
AD0 / DIO0	D0

**Nota:** - AD es para entradas analógicas  
- DIO es entradas o salidas digitales

La cadena de datos recibida por el Coordinador nos brindará información como: entradas digitales habilitadas, entradas analógicas habilitadas y valores sensados. En la tabla 7 se explica como interpretar la cadena recibida.

Tabla 7. Interpretación de la cadena recibida [17]

Bytes	Nombre	Descripción
1	Tamaño de la muestra	Siempre es 1
2	Máscara del canal digital	Bit0 = DIO0
		Bit1 = DIO1
		Bit2 = DIO2
		Bit3 = DIO3
		Bit4 = DIO4
		Bit5 = DIO5
		Bit6 = DIO6
		Bit10 = DIO10
		Bit11 = DIO11
1	Máscara del canal analógico	Bit0 = AD0
		Bit1 = AD1
		Bit2 = AD2
		Bit3 = AD3
Variable	Información	2 bytes = valor de las entradas digitales 2 bytes = valor de la entrada analógica.

- Nota:** - Cuando el bit es igual a 1, la opción esta habilitada
- Si no se habilita ninguna entrada digital no se recibirá los 2 bytes asociados a estas entradas.
  - Por cada canal analógico habilitado se recibirá 2 bytes.

A modo de ejemplo se adjunta en la tabla 8 la interpretación de una secuencia de datos recibida por el Coordinador.

**Tabla 8. Interpretación de una secuencia de datos [17]**

Ejemplo	Explicación
0x01	Siempre es 1
0x0C0C	Se habilitó las entradas digitales 2, 3, 10 y 11.
0x03	Se habilitó las entradas analógicas 0 y 1.
0x0408	High: entrada 3 y 10 Low: entrada 2 y 11
0x03D0	Valor de AD0
0x0124	Valor de AD1

#### Nota

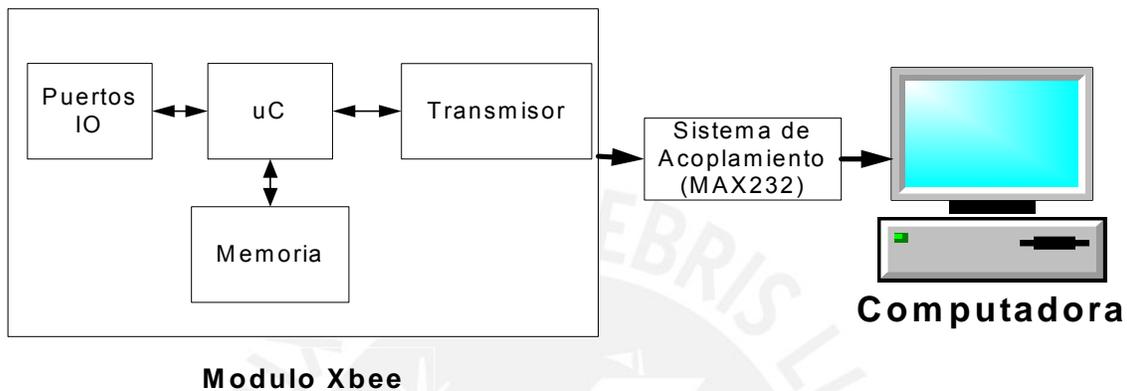
Los valores analógicos son mostrados en valores de 10 bits. La lectura va desde 0x0000 que representa 0V hasta 0x3FF que representa 1.2V. (Los valores de entrada no pueden superar los 1.2V [17]).

### 3.2 Equipo Coordinador

El equipo Coordinador es el encargado de recolectar la información sensada de los equipos terminales y mostrarla en la PC mediante el uso del software XCTU. En la figura 10 se muestra un diagrama de bloques de los procesos involucrados.

Para su implementación se usó el Kit de desarrollo de Maxstream, el cual se muestra en el Anexo A. Adicionalmente, en el Anexo B se muestra el diagrama esquemático realizado en Eagle. El primer diagrama representa los dispositivos de comunicación y el segundo diagrama la parte de alimentación.

En el presente capítulo, se describe a detalle los distintos procesos involucrados en el equipo Coordinador. Además, se explica porque se optó por los módulos Xbee entre tantos que ofrece el mercado. El estudio se centra en tres puntos: (i) Transmisor, (ii) PC y (iii) XCTU.



**Figura 10. Diagrama esquemático del Equipo Coordinador**

### 3.2.1 Transmisor

Estos dispositivos permiten transmitir y recibir inalámbricamente la información desde los equipos terminales hasta los Coordinadores o viceversa [18].

La elección del transmisor debe ser hecha en base a ciertas características como tipo de modulación, frecuencia de trabajo, voltaje de operación, salida, consumo energético, etc. Otro factor importante para la elección del transmisor es el protocolo con el cual trabaja [18] [19].

Según lo analizado en el Capítulo 2, IEEE 802.15.4 (Zigbee) es el protocolo más eficiente para gobernar la comunicación en una red inalámbrica donde los recursos energéticos son limitados. En la tabla 9 se detalla una variedad de transmisores que trabajan bajo este protocolo.

**Tabla 9. Transmisores bajo el protocolo Zigbee [20][21]**

Características	AT86RF210	MC13193	CC2420	XBee
Modulación	DSSS BPSK	DSSS O-QPSK	DSSS	DSSS
Frecuencia	BPSK850-930MHz	2.4GHz	2.4GHz	2.4GHz
Voltaje	1.8-3.6V	2-3.4V	2.1-3.6V	2.8-3.4V
Corriente de transmisión		3µA	17.4mA	45mA
Corriente de recepción	14.5mA	3µA	18.8mA	50mA
Velocidad de Transmisión	20Kbps@868MHz 40Kbps@915MHz	250Kbps	250Kbps	250Kbps
Sensibilidad	-95dB	-92dB	-95dB	-92dB
Potencia de Transmisión	6-12dBm	0dBm	-24dBm	0dBm

En la presente tesis se busca usar dispositivos económicos de forma que sea fácil montar una red de gran magnitud. Esto conllevó a la utilización de los módulos Xbee que son fácilmente encontrados en el mercado y por ende los más económicos [21].

Los módulos Zigbee de Maxstream poseen una gran variedad de características que los hacen adecuados para una comunicación inalámbrica. Maxstream ofrece dos tipos de módulos: el Xbee y el Xbee-PRO [19].

Ambos módulos poseen pines de Rx y Tx, entradas digitales y entradas analógicas. Además, cuentan con un módulo ADC que permite convertir la señal analógica a digital. En el Anexo C se presenta un cuadro detallando la funcionalidad de los módulos en función a sus pines [17].

Por otro lado, los módulos Xbee-PRO posibilitan una comunicación a mayor distancia. En la tabla 10 se presentan algunas diferencias entre estos dispositivos.

**Tabla 10. Diferencias entre los Xbee y los Xbee-PRO [19][21]**

Especificaciones	Xbee	Xbee-PRO
Cobertura (outdoor)	100m	1500m
Potencia de Transmisión	0dbm	20dbm
Sensibilidad en la recepción	-92dbm	-100dbm

Ahora que ya se ha analizado los módulos, es importante analizar cuál es el más económico en función a nuestro alcance.

La mejor forma de resolver este problema es analizando la problemática. Como se comentó en el Capítulo 1, la tesis se desarrollará en un terreno de 3 hectáreas.

3 Hectáreas = 30000m<sup>2</sup>

**Aproximadamente 3Ha**



**Figura 11. Dimensiones del terreno ubicado en Ichahuanca [15]**

Analizando la figura 11 en conjunto con la tabla 5 vemos que los módulos Xbee no soportarían los requerimientos de la problemática debido a su poca cobertura. Debido a esto, se optó por utilizar los módulos Xbee-PRO.

### 3.2.2 PC

La PC es usada para mostrar los datos obtenidos por los sensores de temperatura ubicados en los equipos terminales. Estos datos son visualizados mediante una secuencia de bytes usando el programa XCTU. En la sección 3.1.4 se explicó a detalle la interpretación de esta secuencia de bytes.

La PC y el Xbee se comunican usando comunicación serial (RS-232). Para esto, es necesario usar el circuito MAX232 [23]. En el Anexo B se muestra las conexiones entre el MAX232 y el módulo Xbee-PRO.

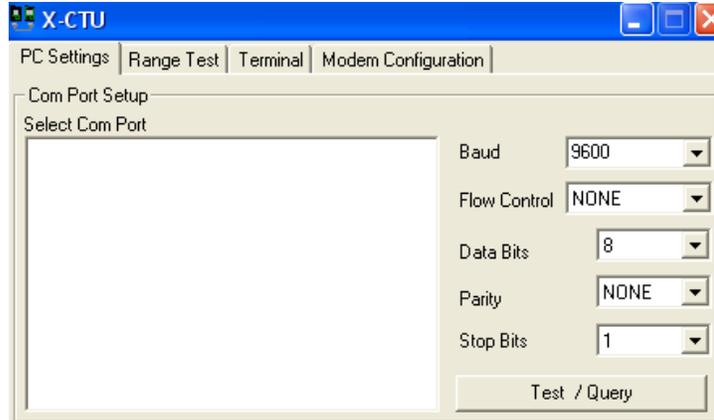
### 3.2.3 XCTU

El software XCTU, desarrollado por Maxstream, es utilizado para configurar y probar los módulos Xbee [17]. En el capítulo 4 se detallarán algunos ejemplos de cómo configurar los módulos Xbee usando el XCTU

A continuación se explica las prestaciones asociadas al software XCTU: “PC Settings”, “Range Test”, “Terminal” y “Modem Configuration”.

#### 3.2.3.1 Configuración de PC “PC Settings”

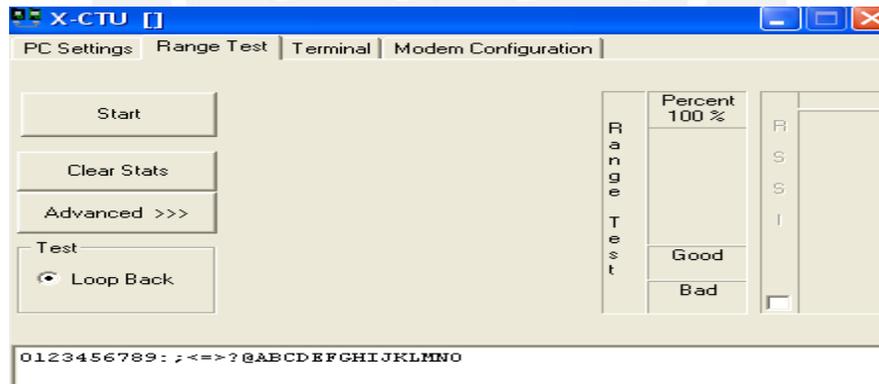
En este módulo se configura los parámetros para una óptima comunicación entre la PC y el módulo Xbee. Por ejemplo: velocidad del UART, control de flujo, paridad y bit de parada. Además, contiene un cuadro que permite seleccionar el puerto con el que se desee trabajar. [24] Figura 12.



**Figura 12. PC Settings [24]**

3.2.3.2 Rango de Testeo “Range Test”

En este módulo se prueba la intensidad de la señal recibida. Esto permite calcular experimentalmente el rango de cobertura bajo un área de trabajo específico. Figura 13.



**Figura 13. Range Test [24]**

3.2.3.3 Equipo Terminal “Terminal”

En este módulo podemos visualizar los datos recibidos. Estos pueden ser mostrados en ASCII o Hexadecimal. Figura 14.

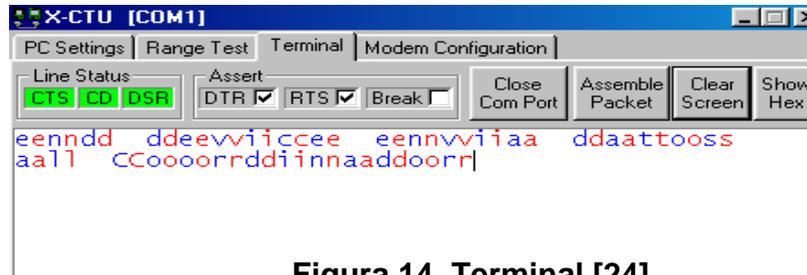


Figura 14. Terminal [24]

### 3.2.3.4 Configuración de Módem “Modem Configuration”

En este módulo configuramos los parámetros que determinan el comportamiento de la red. Estos parámetros fueron explicados en la sección 3.1. Figura 15.



Figura 15. Configuración de Modem [24]

## 3.3 Equipo Terminal

El equipo terminal es el encargado de enviar al Coordinador la información proveniente de los sensores. En la figura 16 se muestra un diagrama de los procesos involucrados. Para su implementación se usó el Kit de desarrollo de Maxstream, el cual se muestra en el Anexo D. Adicionalmente, en el Anexo E se muestra el diagrama esquemático realizado en Eagle. El primer diagrama representa los dispositivos de comunicación y el segundo diagrama la parte de alimentación.

En la presente sección, se describe a detalle los distintos procesos involucrados en el equipo terminal. Además, se realiza un estudio de los distintos sensores y baterías que podrían encajar en nuestra aplicación. El estudio está centrado en tres puntos: (i) Transmisor, (ii) Sensores y (iii) Batería.

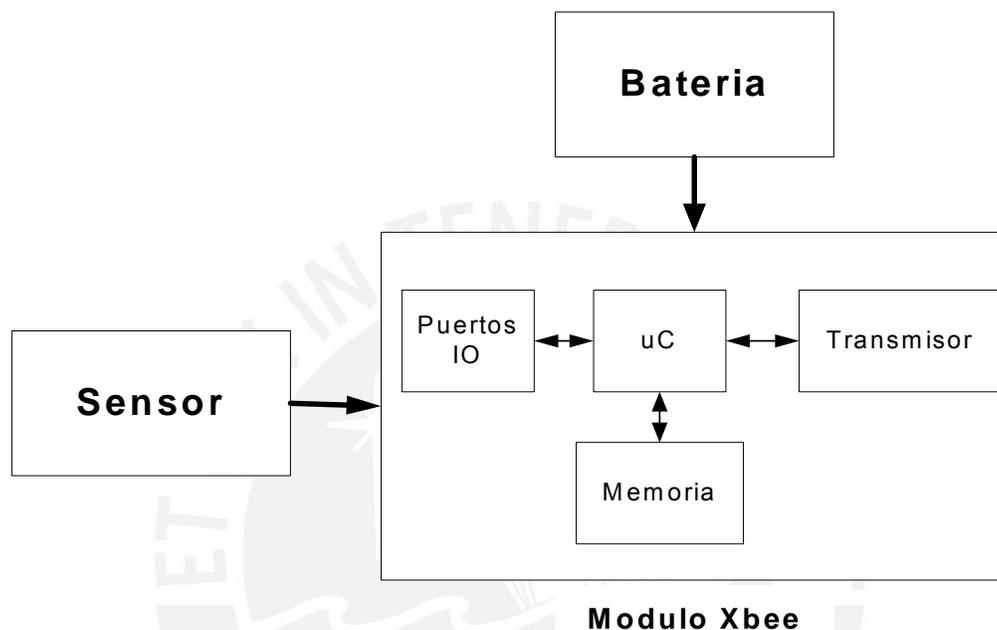


Figura 16. Diagrama de bloques del Equipo Terminal

### 3.3.1 Transmisor

Los transmisores utilizados en el equipo terminal son los mismos que en el equipo Coordinador. En el Anexo C se presenta un cuadro detallando la funcionalidad de los módulos Xbee en función a sus pines [17] [19]. No obstante, estos deben tener una configuración distinta que les permita conectarse con los sensores y trabajar en modo de equipo terminal. En el capítulo 4 se detallarán algunos ejemplos de cómo configurar los módulos Xbee usando el XCTU para que operen como Equipo Terminal [17].

### 3.3.2 Sensores

Un sensor es un dispositivo que detecta fenómenos físicos o químicos, llamadas variables de instrumentación, como la temperatura, la intensidad luminosa, la distancia, la aceleración, la presión, la fuerza, la torsión, la humedad, el Ph, etc. y convierte estos fenómenos físicos o químicos en un cambio de alguna de las siguientes variables, por ejemplo: resistencia eléctrica, tensión eléctrica y corriente eléctrica. Esto permite que luego pueda ser procesado por una PC o un microcontrolador y ser transmitido.

Los sensores pueden ser clasificados en dos categorías según su modo de transferencia de información al procesador.

- Sensores Digitales
- Sensores Analógicos

Los sensores analógicos tienen una salida analógica mientras que los sensores digitales tienen una salida digital. Por otro lado, los sensores pueden ser clasificados según el tipo de energía que reciben para que luego sea convertido a otro tipo de energía (voltaje o corriente).

#### Sensores Térmicos

- Sensores de Temperatura: termómetros y termostatos.

#### Sensores Mecánicos

- Sensores de Presión: barómetro.
- Sensores de fluido líquido.
- Sensores mecánicos: acelerómetros y sensores de posición.

#### Sensores Ópticos

- Sensores ópticos: basado en la emisión de un pulso de luz.

### Sensores Acústicos

- Sensores de sonido: micrófonos.

En la presente investigación se busca desarrollar un sistema capaz de monitorear la temperatura en los estanques. Para el diseño se usa sensores térmicos KTF20. Los cuales son analógicos y facilitarán la adquisición de datos ya que los dispositivos Xbee-Pro contienen entradas analógicas. En la figura 17 podemos visualizar el sensor KTF20.



**Figura 17. Sensor térmico KTF20 [26]**

La variación de temperatura se ve reflejada en la resistencia eléctrica en sus terminales. En la tabla 11 se mencionan sus especificaciones técnicas.

**Tabla 11. Especificaciones técnicas del sensor KTF20 [26]**

Rango de Operación	Desde 10C hasta 60C
Valor Nominal	4KOhms a 20C
Curva característica	0.12KOhms/ C

### **3.4 Energía**

Una de las limitaciones más cruciales de una Red Inalámbrica de Sensores es la energía ya que estos son alimentados con baterías. A esto se debe la necesidad

de usar un protocolo, Zigbee, capaz de transmitir usando la menor cantidad de energía [18] [16].

Las baterías pueden ser clasificadas en dos categorías: recargables y no-recargables. También pueden ser clasificadas en base al material electroquímico utilizado para polarizarlas: NiCd, NiZn, AgZn y NiMh [25].

En la tabla 12 se muestra una lista de baterías comercialmente disponibles.

**Tabla 12. Baterías en el mercado actual [25]**

Características	Alkaline	Alkaline	Alkaline	Nickel-Cadmium	Lead-Acid
Voltaje	9V	1.5V	1.5V	1.2V	6V
Volumen	23ml	8ml	55.9ml		128ml
Capacidad	580Ah	2.8Ah		1.08Ah	1.3Ah
Peso	49g	27g	141g	23g	300g
Densidad de Energía (Wh)	5.22	4.2		1.296	5.1
Densidad Volumétrica (Wh/l)	226	525			39.8
Densidad Gravitacional (Wh/Kg)	106	155		56	17
Recargable	No	No	No	Si	Si
Fabricante	Duracell	Duracell	Panasonic	Panasonic	Panasonic

A continuación se explica el procedimiento para calcular el tiempo de vida de las baterías: [12]

## Parámetros

Consumo energético = Los dispositivos Xbee consumen 50mA en la transmisión.

Capacidad = Se tiene una batería de 2.8Ah.

Tiempo de vida= Capacidad/Consumo Energético = 2.8 Ah / 50 mA = 56 horas

Nota: Se asume un tiempo de vida de 56 horas siempre y cuando se transmita sin parar. Esto no sucede en realidad ya que el dispositivo Xbee permanece el mayor del tiempo dormido (1 uA), por lo que el tiempo de vida es mucho mayor al calculado.

### **3.5 Chasis para los dispositivos**

Los dispositivos Xbee se colocarán en chasis que cumplan con los siguientes requerimientos:

- Aislante y térmico ya que los dispositivos estarán en la intemperie.
- Se usará material especial que no atenué la intensidad de la señal.
- Cumplan con las siguientes medidas: 2.438 cm x 3.294 cm. [12]

### **3.6 Precios**

En el presente proyecto se utilizarán dispositivos Xbee-PRO. Se aproxima un número de 25 dispositivos en toda la red. Para esto se tiene: [12]

Precio Unitario: \$32

Número de dispositivos: 25

Precio Total:  $\$32 \times 25 = \$800$

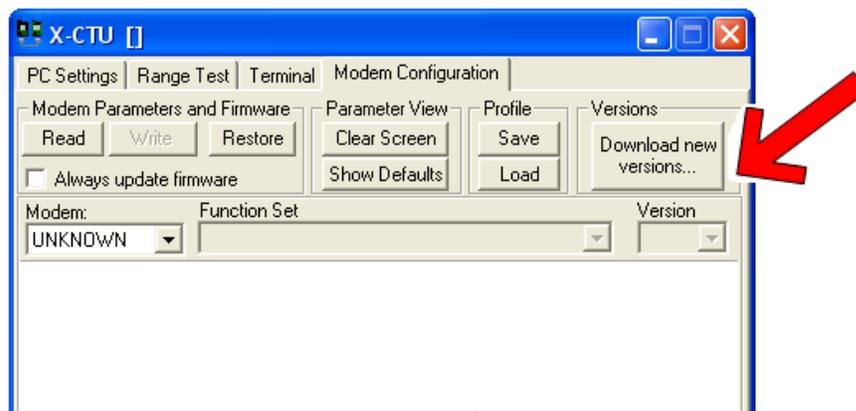
## CAPÍTULO 4: PRUEBAS DE LA RED

En el presente capítulo, se explica el procedimiento realizado para las pruebas con el módulo Xbee. La explicación esta centrada en cinco puntos: (i) Descarga del software X-CTU, (ii) Actualizar firmware, (iii) Punto a punto – UART, (iiii) Punto multipunto – UART y (iiiiii) Punto multipunto – Puertos IO.

### 4.1 Descarga del software para programar los Xbee

A continuación se detallan los pasos necesarios para descargar el software X-CTU.

1. Ingresar a la Web Site de Maxstream para descargar el software.  
<http://www.digi.com/support/productdetl.jsp?pid=3352&osvid=57&tp=4&s=316>.
2. Ingresar al icono X-CTU que se encuentra en el Escritorio.   
X-ctu.lnk
3. Seleccionar la opción “Download new versions” para obtener los últimos firmware. Figura 18.



**Figura 18. Programa X-CTU**

## 4.2 Actualización del firmware de los equipos

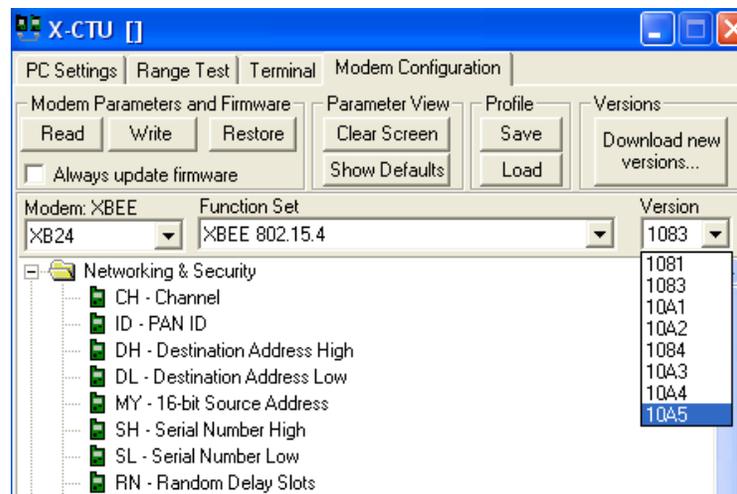
A continuación se detallan los pasos necesarios para actualizar el firmware de los equipos Xbee.

1. Insertar el equipo Xbee en el módulo de programación. Colocar el cable DB9 que permitirá la comunicación entre el Módem y la PC. Figura 19



**Figura 19. Cable Serial**

2. Presionar “Read” para ver el firmware que posee actualmente el equipo. El firmware se mostrará en el icono “Version”
3. Seleccionar en “Version” el firmware que se desea actualizar. Figura 20



**Figura 20. Seleccionar firmware**

4. Presionar “Write” para grabar el firmware seleccionado en la memoria.
5. Presionar “Restore” una vez finalizada la grabación.

#### 4.3 Prueba – punto a punto – UART - Xbee

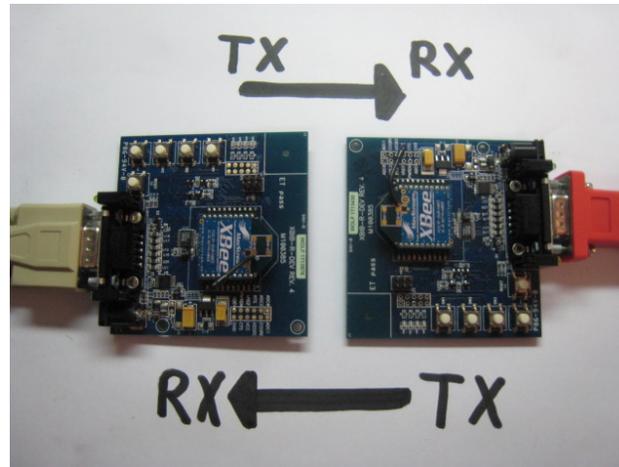
En una topología punto a punto se necesitan 2 equipos transmisores. Estos no poseen ninguna jerarquía entre ellos. Esta prueba consistirá en enviar datos de un Módem a otro por el puerto Serial.

A continuación se detallan los pasos necesarios para configurar los equipos en este modo de operación.

1. Insertar el equipo Xbee en el módulo de programación. Colocar el cable DB9 que permitirá la comunicación entre el Módem y la PC.
2. Presionar “Read” para ver la configuración actual de los parámetros del módulo.
3. Presionar “Show defaults” para volver a la configuración por defecto.
4. Para una configuración Punto a punto los parámetros **MY**, **DH** y **DL** deben ser 0. Otro modo es que el **MY** de uno sea el **DL** del otro y viceversa (**DH** siempre debe ser 0).
5. Presionar “Write” para grabar los parámetros en la memoria.

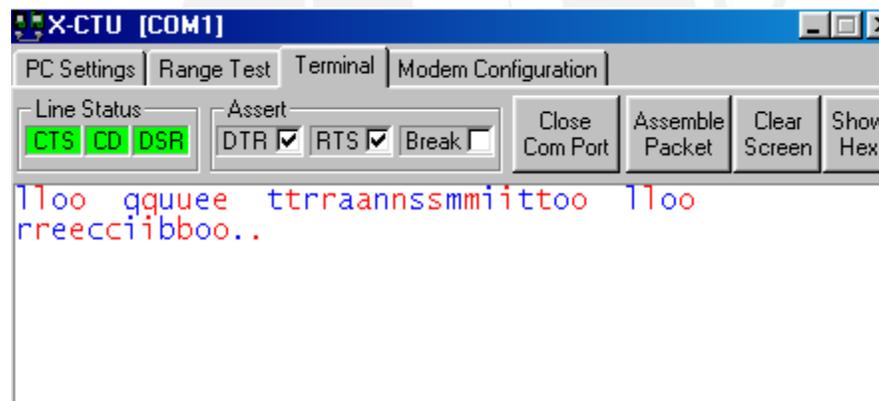
Realizar los pasos anteriores en el segundo módulo Xbee.

Se conecta el cable DB9 por el módulo que se desea transmitir. El “Loop Back” (dispositivo rojo) es para reenviar todo dato recibido. De esta forma poder visualizar los datos enviados por un módulo y recibidos por el otro módulo. En la figura 21 podemos visualizar la forma de conexión.



**Figura 21. Conexión para prueba punto a punto - UART**

El programa XCTU (en el "Terminal") muestra en azul los datos enviados y en rojo los datos recibidos. Figura 22.



**Figura 22. Datos recibidos por el Terminal**

Esta misma prueba se puede realizar para que transmita en otro Xbee.

#### **4.4 Prueba – punto multipunto – UART - Xbee**

En una topología punto multipunto se necesita un equipo Coordinador y uno o más equipos terminales. Esta prueba consistirá en enviar datos del Coordinador a los equipos terminales y viceversa.

A continuación se detallan los pasos necesarios para configurar los equipos en este modo de operación.

- 1 Insertar el equipo Xbee en el módulo de programación. Colocar el cable DB9 que permitirá la comunicación entre el Módem y la PC.
- 2 Presionar “Read” para ver la configuración actual de los parámetros del módulo.
- 3 Presionar “Show defaults” para volver a la configuración por defecto.

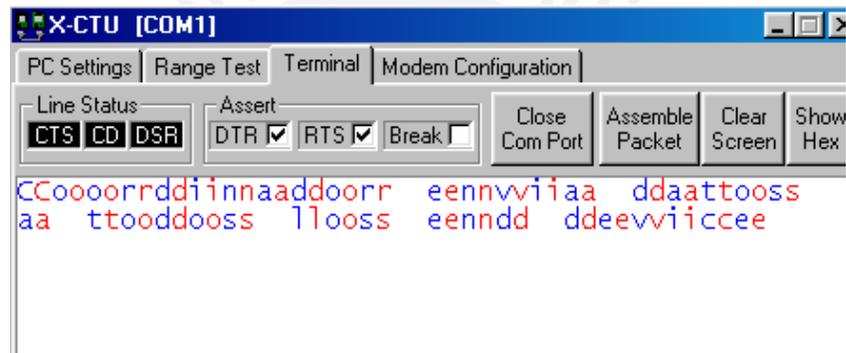
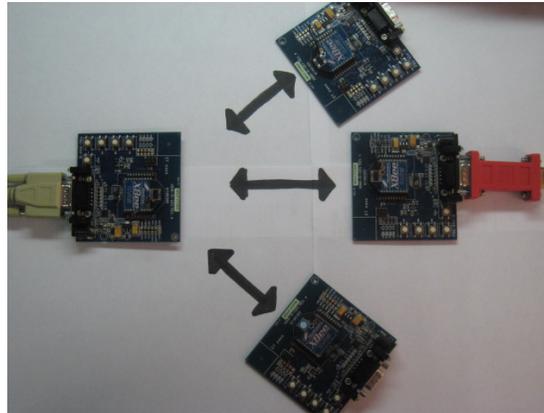
#### Equipo Coordinador

- 4 Los parámetros DH y MY deben ser 0 y el DL debe ser \$FFFF. Por otro, se debe configurar el parámetro CE a 1 para que opere como Maestro.

#### Equipos Terminales

- 4 Los parámetros DH y DL deben ser 0. Cada esclavo debe tener un parámetro MY diferente uno con otro, pero es importante que ninguno sea igual a 0. Por otro lado, se debe configurar el parámetro CE a 0 para que opere como esclavo.
- 5 Presionar “Write” para grabar los parámetros en la memoria.

Se conecta el cable DB9 en el Coordinador y el “Loop Back” (dispositivo rojo) en cualquier equipo terminal. Se podrá visualizar los datos recibidos indistintamente en que equipo terminal se ponga el “loop back” ya que el coordinador envía un broadcast a todos los equipos terminales. En la figura 23 podemos visualizar la forma de conexión y los datos recibidos.



**Figura 23. Conexión para prueba punto multipunto - UART**

Otra prueba es cuando se conecta el cable DB9 en un equipo terminal y el “Loop Back” (dispositivo rojo) en el Coordinador. En este caso a diferencia del anterior, los equipo terminales solo envían datos al coordinador, pero no a los otros equipos terminales. En la figura 24 podemos visualizar la forma de conexión y los datos recibidos.

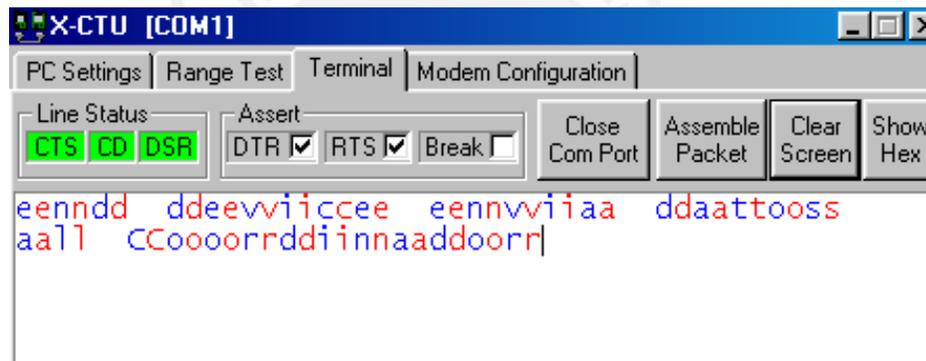
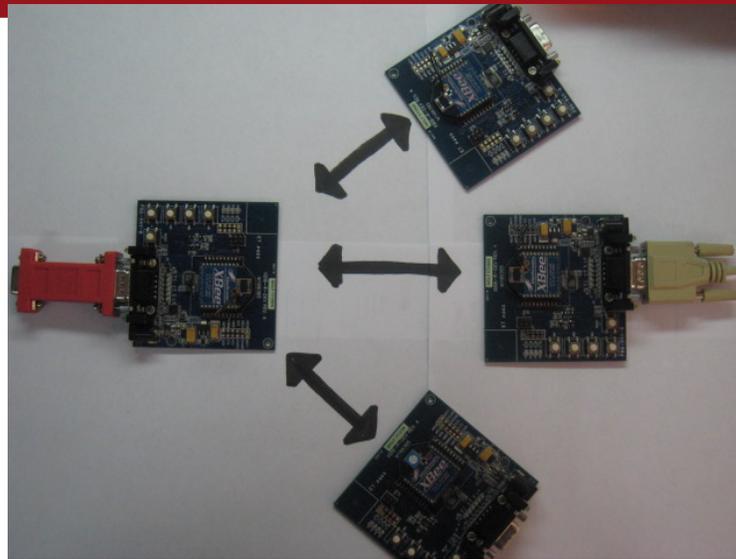


Figura 24. Conexión para prueba punto multipunto - UART

#### 4.5 Prueba – punto multipunto – Monitoreo IO - Xbee

El modo de operación será el mismo que la prueba point to point UART, solo que ahora se utilizará los puertos IO del módulo Xbee.

El objetivo de esta prueba es visualizar por el UART los puertos IO de todos los módulos remotos. Para lograr esto, se deben configurar algunos parámetros adicionales como: Dx, IR, IU. A continuación se detallan los pasos necesarios para configurar los equipos.

- 1 Insertar el equipo Xbee en el módulo de programación. Colocar el cable DB9 que permitirá la comunicación entre el Módem y la PC.
- 2 Presionar “Read” para ver la configuración actual de los parámetros del módulo.
- 3 Presionar “Show defaults” para volver a la configuración por defecto.

#### Equipo Coordinador

- 4 Los parámetros DH y MY deben ser 0 y el DL debe ser \$FFFF. Por otro, se debe configurar el parámetro CE a 1 para que opere como Maestro.
- 5 IU=1. Esto permite que los datos recibidos por RF sean enviados por el UART.

#### Equipos terminales

- 4 Los parámetros DH y DL deben ser 0. Cada esclavo debe tener un parámetro MY diferente uno con otro, pero es importante que ninguno sea igual a 0. Por otro lado, se debe configurar el parámetro CE a 0 para que opere como esclavo.

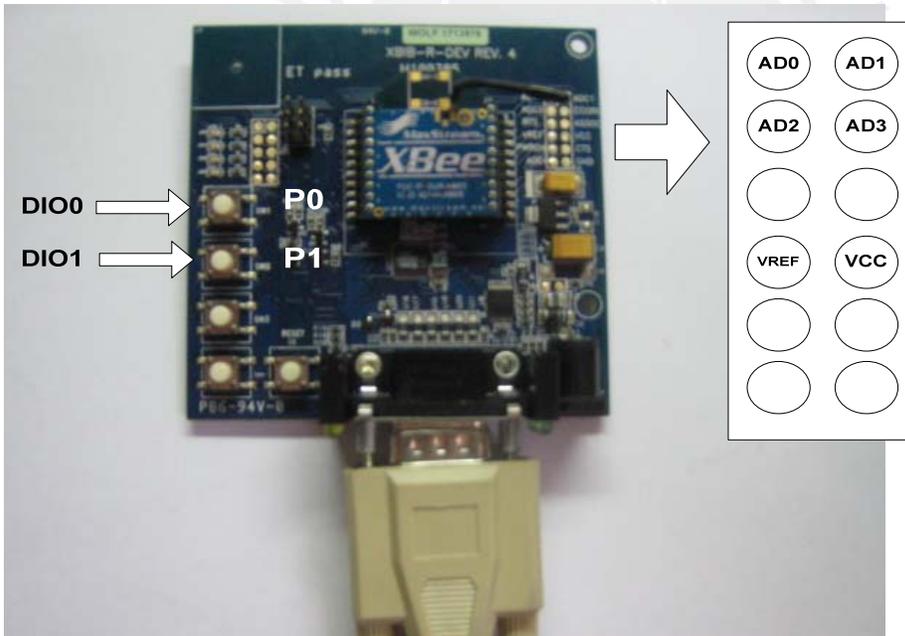
- 5 D0=0x3                    (Se configura como entrada digital DIO0 y DIO1)  
D1=0x3  
D2=0x2                    (Se configura como entrada analógica AD2 y AD3)  
D3=0x2

IR=0x4E20. Este parámetro permite configurar la frecuencia de muestreo.  
 $IR \cdot 1ms = T_{muestreo}$ . En este caso se configuró un  $T_{muestreo} = 20seg$ .

6 Presionar “Write” para grabar los parámetros en la memoria.

Para la siguiente prueba se utilizan los pulsadores de la tarjeta para simular un cambio de voltaje en las entradas digitales. Cuando se presiona el pulsador arroja 0V y sin pulsar arroja 3.3V.

Por otro lado se cuentan con entradas analógicas con un convertidor ADC de 10 bits. Cuando la entrada tiene un valor igual a VREF el resultado es 0x3FF. Para nuestro ejemplo VREF=VCC. En la figura 25 se muestra la distribución de los pulsadores y de las entradas analógicas.

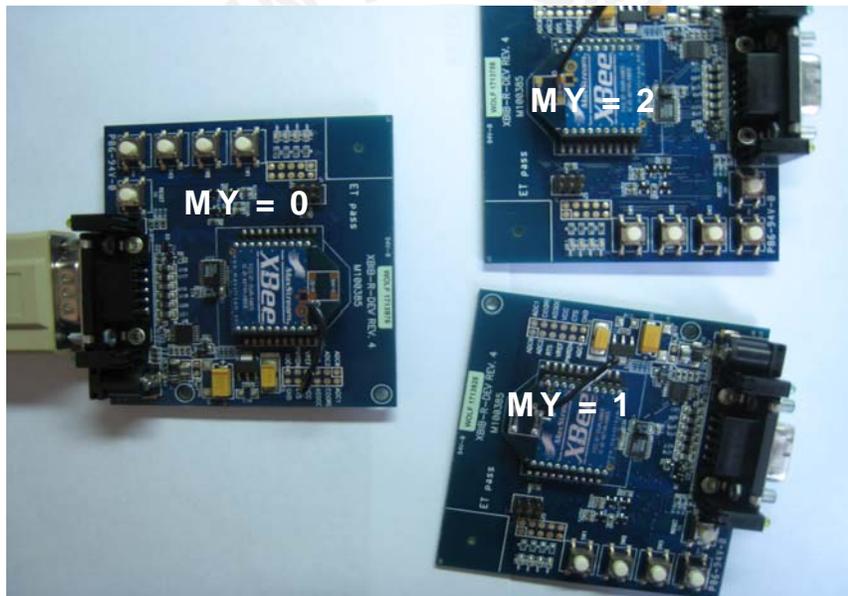


**Figura 25. Pulsadores y entradas analógicas**

Se realizará una secuencia preestablecida con los pulsadores y entradas analógicas para que luego se pueda interpretar la cadena recibida en el Coordinador.

- Ninguno pulsado. Entradas analógicas igual a 0.
- P0 pulsado. Entradas analógicas igual a 0.
- P1 pulsado. Entradas analógicas igual a 0.
- Ninguno pulsado. AD2 igual a VCC.
- Ninguno pulsado. AD3 igual a VCC.

Es importante realizar el cambio de secuencia antes de los 20seg ya que este es el tiempo de muestreo. En la figura 26 podemos visualizar la forma de conexión.



**Figura 26. Conexión para prueba punto multipunto - Monitoreo IO**

A continuación se presenta y se explica la cadena de caracteres que se recibe de los módulos remotos. Para una explicación mas detallada de cómo interpretar los datos leer la sección de Monitoreo IO.

Ningún pulsado. Entradas analógicas igual a 0

7E 00 0E 83 00 01 40 00 01 18 03 00 03 00 00 00 00 4B

7E	“Flag”.
00 0E	Tamaño del paquete recibido.
83	Código API que hace referencia a dato recibido por RF.
00 01	Dirección del módulo que envió información.
40	Nivel RSSI.
00	Opciones.
01	Cantidad de muestras.
18 03	Configuración de las entradas. (2 digitales y 2 analógicas)
00 03	Valor de los pines digitales. (Ninguno pulsado)
00 00	AD2=0V
00 00	AD3=0V
4B	Checksum

En las siguientes tramas sólo se hará énfasis en la dirección del módulo que envió la información, valor de los pines digitales y valor de las entradas analógicas.

7E 00 0E 83 00 02 43 00 01 18 03 00 03 00 00 00 00 23

00 02	Dirección del módulo que envió información.
00 03	Valor de los pines digitales. (Ninguno pulsado)
00 00	AD2=0V
00 00	AD3=0V

P0 pulsado. Entradas analógicas igual a 0

7E 00 0E 83 00 01 30 00 01 18 03 00 02 00 00 00 00 3E

- 00 01 Dirección del módulo que envió información.
- 00 02 Valor de los pines digitales. (P0 pulsado)
- 00 00 AD2=0V
- 00 00 AD3=0V

7E 00 0E 83 00 02 52 00 01 18 03 00 02 00 00 00 00 58

- 00 02 Dirección del módulo que envió información.
- 00 02 Valor de los pines digitales. (P0 pulsado)
- 00 00 AD2=0V
- 00 00 AD3=0V

P1 pulsado. Entradas analógicas igual a 0

7E 00 0E 83 00 01 28 00 01 18 03 00 01 00 00 00 00 CE

- 00 01 Dirección del módulo que envió información.
- 00 03 Valor de los pines digitales. (P1 pulsado)
- 00 00 AD2=0V
- 00 00 AD3=0V

7E 00 0E 83 00 02 35 00 01 18 03 00 01 00 00 00 00 21

- 00 02 Dirección del módulo que envió información.
- 00 03 Valor de los pines digitales. (P1 pulsado)
- 00 00 AD2=0V
- 00 00 AD3=0V

Ninguno pulsado. AD2 igual a VCC

7E 00 0E 83 00 01 42 00 01 18 03 00 03 03 FF 00 00 74

00 01 Dirección del módulo que envió información.  
00 03 Valor de los pines digitales. (Ninguno pulsado)  
00 00 AD2=VCC  
00 00 AD3=0V

7E 00 0E 83 00 02 38 00 01 18 03 00 03 03 FF 00 00 A1

00 02 Dirección del módulo que envió información.  
00 03 Valor de los pines digitales. (Ninguno pulsado)  
00 00 AD2=VCC  
00 00 AD3=0V

Ninguno pulsado. AD3 igual a VCC

7E 00 0E 83 00 01 33 00 01 18 03 00 03 00 00 03 FF 4D

00 01 Dirección del módulo que envió información.  
00 03 Valor de los pines digitales. (Ninguno pulsado)  
00 00 AD2=0V  
00 00 AD3=VCC

7E 00 0E 83 00 02 40 00 01 18 03 00 03 00 00 03 FF 62

00 02 Dirección del módulo que envió información.  
00 03 Valor de los pines digitales. (Ninguno pulsado)  
00 00 AD2=0V

Para el diseño final se contarán con 25 estanques, los cuales tendrán su propio sensor de temperatura y su propio dispositivo Xbee - PRO. La disposición final se puede visualizar en la figura 27. Se muestra para el caso que fueran 2.



**Figura 27. Diseño final para la localidad de Ichahuanca**

Es importante mencionar que se usarán dispositivos Xbee-PRO para cumplir con el requerimiento de distancia. Debido a que son 25 estanques, se contarán con 25 equipos terminales y un equipo coordinador. Su configuración es la que se explica al inicio de esta sección. Por otro lado, se usa un juego de resistencias para convertir el cambio de resistividad de los sensores en un cambio de voltaje para que pueda ser leído por los dispositivos Xbee. Estos sensores fueron explicados en el capítulo 3.

## CONCLUSIONES

- 1 Es necesaria la implementación de una red inalámbrica de sensores para el monitoreo de variables en la crianza de ovas y alevines ya que los métodos actuales no permiten el óptimo desarrollo de la especie ni se dan abasto para cumplir con la demanda actual del mercado.
- 2 Para cumplir con el objetivo de monitorear la temperatura en la crianza de ovas y alevines se puede plantear múltiples opciones. No obstante, la utilización de una red inalámbrica usando el protocolo Zigbee es óptima debido a su bajo costo y bajo consumo de energía comparado con otros protocolos inalámbricos como Wi-Fi, Bluetooth y Wimax.
- 3 Para el correcto funcionamiento de una red de sensores es importante la etapa de diseño. Para ello, se debe tomar en cuenta distintos aspectos como Características, Arquitectura, Aplicaciones y Clasificaciones. Estos aspectos variarán en función a la aplicación en la cual se este trabajando.
- 4 Debido a la distancia entre los sensores y el modo de adquisición de datos se optó por una solución basada en un equipo Coordinador y equipos terminales. El equipo coordinador será el encargado de recolectar la información sensada por los equipos terminales. Es importante mencionar que el dispositivo transmisor es el mismo en ambos casos, lo único en que se diferencian es en el modo de configuración.
- 5 En función a las pruebas realizadas, se mostró que la cobertura de los dispositivos Zigbee v1 son suficiente para los parámetros de la presente aplicación, pero en caso de que se necesite mayor cobertura será necesario utilizar los dispositivos Zigbee v2.

## RECOMENDACIONES

1. Para un correcto funcionamiento de la red es importante realizar un análisis detallado de los requerimientos que este pueda necesitar como: cobertura y números de dispositivos que formarán la red. Si se requiere una mayor cobertura o mayor número de equipos terminales será necesario utilizar los dispositivos v2.
2. En función a los requerimientos que se necesiten, se actualizará el firmware necesario. Para nuestra aplicación en la cual se requiere entradas analógicas es recomendable trabajar bajo el firmware 10A5.
3. El tiempo de muestreo variará en función de las variables que se deseen analizar. Para esta aplicación, variable temperatura, bastará con una muestra cada cierto número de segundos ya que esta variable no presenta variaciones bruscas en función del tiempo. En caso se desee monitorear variables con mayor grado de variabilidad se deberá disminuir el tiempo de muestreo.
4. Es recomendable que cada estanque posea su propio dispositivo de transmisión. Esto se debe a que al poseer seis entradas analógicas permitirá futuras aplicaciones para monitorear más variables a parte de la temperatura. Por otro lado, se podría contar con un dispositivo de transmisión por cada seis estanques, ganando así una red más económica.

## FUENTES

- [1] Eren, Halit. 2006. **Wireless sensors and instruments: networks, design and applications.**
- [2] Mahgoub, Imad. 2005. **Sensor network protocols.**
- [3] Bray, Jennifer. 2002. **Bluetooth: connect without cables.**
- [4] Alcocer Garcia, Carlos. 2000. **Redes de Computadoras.**
- [5] Ilyas, Mohammed. 2005. **Handbook of sensors network: compact wireless and wired sensing systems.**
- [6] Zurawski, Richard. 2005. **The industrial communication technology handbook.**
- [7] Ohrtman, Frank. 2003. **Wi-Fi handbook: building 802.11b wireless networks.**
- [8] Navarro, Maria. 2000. **Zigbee: Nuevo estándar de tecnología inalámbrica.**
- [9] Página Web acerca del Fondo Nacional de desarrollo Pesquero.  
<[www.fondepes.gob.pe](http://www.fondepes.gob.pe)>
- [10] Página Web de tecnología actual. Compañía ABB.  
<<http://www.abb.com/product/seitp330/c1256ccb004e516c802567e4004696bc.aspx>>

- [11] Página Web relacionada a componentes acuáticos. Compañía Aquatic.  
<<http://www.aquaticeco.com/>>
- [12] Página Web de productos de transmisión inalámbrica. Compañía MaxStream.  
<<http://www.maxstream.net/>>
- [13] Página Web de productos de transmisión inalámbrica. Compañía Crossbow.  
<<http://www.xbow.com/Home/HomePage.aspx>>
- [14] Página Web de información general de producción y avances. Ministerio de la producción.  
<<http://www.produce.gob.pe/>>
- [15] Página Web de Información relacionada a la Comunidad de Ichahuanca. Región de Junín.  
<<http://www.regionjunin.gob.pe/frames/transparency/transparency.asp>>
- [16] Página Web relacionada al Protocolo Zigbee. Compañía Digiboard.  
<<http://www.digi.com/technology/rf-articles/wireless-zigbee.jsp>>
- [17] Enlace Web para visualizar Manual Xbee. Provee información más detallada de las prestaciones y configuraciones de los dispositivos Xbee.  
<[http://ftp1.digi.com/support/documentation/manual\\_xb\\_oem-rf-modules\\_802.15.4\\_v1.xAx.pdf](http://ftp1.digi.com/support/documentation/manual_xb_oem-rf-modules_802.15.4_v1.xAx.pdf)>
- [18] Eren, Halit. 2006. **Wireless sensors and instrument: networks, design and application**

- [19] Página Web de especificaciones técnicas del módulo Xbee. Compañía Digiboard.  
<<http://www.digi.com/products/wireless/point-multipoint/xbee-series1-modulespecs.jsp>>
- [20] Enlace Web de Sistemas embebida – Transmisores Zigbee – CC2420.  
<<http://embedded-system.net/lang/es/chipcon-cc2420-zigbeeieee-802154-rf-transceiver.html>>
- [21] Página Web de Información relacionada a los módulos Xbee - Compañía Digiboard  
<[www.maxstream.net](http://www.maxstream.net)>
- [22] Enlace Web de información del protocolo Zigbee – Aspectos generales.  
<<http://rua.ua.es:8080/bitstream/10045/1109/1/InformeTecZB.pdf>>
- [23] Enlace Web de descarga de Hoja de datos – MAX232.  
<[http://www.datasheetcatalog.net/es/datasheets\\_pdf/M/A/X/2/MAX232.shtml](http://www.datasheetcatalog.net/es/datasheets_pdf/M/A/X/2/MAX232.shtml)>
- [24] Página Web de información del software XCTU - Compañía Digiboard.  
<<http://www.digi.com/support/productdetl.jsp?pid=3257&osvid=0&s=268&tp=3>>
- [25] Kiehne, H. A. ed. 2003. **Battery technology handbook**
- [26] Enlace Web de descarga de Hoja de datos – Sensor térmico KTF20.  
<<http://europe.hbc.honeywell.com/cz/pdf/en0b0362-ge51r0907.pdf>>