



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

**“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA EXPERIMENTAL
DE MONITOREO BASADO EN UNA RED INALÁMBRICA
PARA COMPARAR EL CONSUMO DE ENERGÍA Y
CALIDAD DE SERVICIO DE UNA RED DE SENSORES
EN UN ENTORNO ACUÁTICO”**

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

Presentada por:

Gabriela Alejandra Romero Muñoz.

Gerardo Francisco Sacarelo Vásquez.

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2014

AGRADECIMIENTO

Un encarecido agradecimiento al director del CENAIM, Dr. Stanislaus Sonnenholzner, por habernos permitido hacer las respectivas pruebas en las estaciones experimentales; y al Director del CVR, Dr. Daniel Ochoa, por conceder el uso de los laboratorios y materiales necesarios en este proyecto y su gran apoyo.

A nuestras familias y amigos, por apoyarnos, por colaborar con nuestro proyecto final pero sobre todo, por confiar en nosotros. En especial a los profesores,

por sus conocimientos impartidos,
observaciones y sugerencias
precisas.

DEDICATORIA

A mi abuelita que está en los cielos, un ejemplo a seguir, en estos momentos estaría orgullosa por la meta alcanzada.

A mi familia y amigos por estar en las buenas y malas, dándome fuerzas para seguir adelante cada día.

Gabriela Romero Muñoz.

DEDICATORIA

Al creador de todas las cosas, que me ha dado fortaleza para continuar cuando a punto de caer he estado; con toda la humildad que de mi corazón puede emanar, le dedico inicialmente mi trabajo. A mi familia, quienes me han instado y brindado todo lo necesario para llegar hasta donde estoy, siendo el soporte preciso para mi desarrollo y ejemplo de superación. A mis amigos y amigas, quienes gracias a su apoyo y conocimientos hicieron de esta experiencia una de las mejores.

Gerardo Sacarelo Vásquez.

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

PhD. Boris Vintimilla Burgos.

PRESIDENTE

MSc. Patricia Chávez Burbano.

DIRECTOR DE TESIS

Ignacio Marín-García, MSIS

MIEMBRO PRINCIPAL DEL TRIBUNAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

Gabriela Romero Muñoz

Gerardo Sacarelo Vásquez

RESUMEN

El presente documento propone la implementación de un sistema inalámbrico de sensores, cuya función es monitorear la producción acuícola en un área determinada con buena calidad de servicio y bajo consumo de energía en medios acuáticos.

En el capítulo 1, se describió la base del estudio propuesto iniciando con la problemática y la propuesta del proyecto, se definió la justificación de la temática, y finalmente los procedimientos y las restricciones.

En el capítulo 2, se detallará todo lo relacionado a las redes inalámbricas especialmente a la topología tipo malla, dándole un mayor enfoque a la tecnología ZigBee, módulos empleados para la implementación. Para luego, detallar las futuras aplicaciones y determinar si es viable en el medio acuático.

Con el capítulo 3, se desplegó el diseño de la red de área personal inalámbrica en medios acuáticos como piscinas, tanques, etc., lugares donde se realiza acuicultura, los cuales requieren analizar periódicamente ciertos parámetros importantes del agua, por lo tanto, esta red tuvo la finalidad de

interconectar estos lugares, para así, obtener dicha información en tiempo real.

Posteriormente, en el capítulo 4 se describirá las características de cada componente y dispositivo que se utilizó para el diseño de la red. Se da una previa introducción de los softwares y pautas para configurar cada uno de los programas que se empleó en la implementación de la red.

En el capítulo 5, se explicará la forma en que se tomaron los datos de los diferentes parámetros a analizar, la calidad de servicio y el consumo de energía, en cada uno de los ambientes en los que se sometieron.

Finalmente, en el último capítulo, se analizará los resultados obtenidos de consumo de energía y calidad de servicio en cada uno de los escenarios. Adicional, se determinaron las limitaciones de cada uno de los módulos necesarios para cubrir las áreas deseadas y se realizaron estudios exhaustivos para determinar si la red es viable tanto en características como en infraestructura para automatizar los procesos en medios acuáticos.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
AGRADECIMIENTO	II
DEDICATORIA	IV
DEDICATORIA	V
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	VI
DECLARACIÓN EXPRESA	VII
RESUMEN.....	VIII
ÍNDICE GENERAL	X
ABREVIATURAS	XV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XX
ÍNDICE DE TABLAS	XXIII
INTRODUCCIÓN.....	XXIV

CAPÍTULO 1

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción del problema	27
1.2 Objetivo General	29
1.3 Objetivos Específicos	29

1.4	Justificación.....	30
1.5	Metodología	32
1.6	Resultados esperados.....	35
1.7	Limitaciones	35

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1	Transmisión inalámbrica de datos	37
2.2	Redes inalámbricas tipo malla.....	40
2.3	Protocolos en las redes tipo malla	43
2.3.1	Protocolos basados en topología	44
2.3.2	Protocolos basados en posición.....	45
2.4	Tecnología ZigBee	46
2.4.1	Componentes de la red.....	48
2.4.2	Arquitectura	49
2.5	Seguridad en ZigBee.....	53
2.5.1	Cifrado	54
2.5.2	Autenticación	55
2.6	Aplicaciones de ZigBee	56

CAPÍTULO 3

DISEÑO

3.1 Características de diseño para redes inalámbricas en medios acuáticos.....	60
3.1.1 Diseño del enlace	62
3.1.2 Esquema de la red.....	66
3.2 Requisitos para el diseño de la red	68
3.3 Diseño electrónico.....	70
3.4 Diseño de pruebas	72

CAPÍTULO 4

IMPLEMENTACIÓN

4.1 Hardware	75
4.1.1 Microcontrolador	76
4.1.2 Sensor de temperatura	79
4.1.3 Puerta de enlace.....	80
4.2 Software	82
4.2.1 Software para el microcontrolador	82
4.2.2 Software para los módulos de transceptor.....	85

4.2.3 Software para la puerta de enlace	86
4.3 Configuración	87
4.3.1 Configuración del Arduino IDE	88
4.3.2 Configuración de los XBee en X-CTU.....	88
4.4 Costos de implementación	90
 CAPÍTULO 5	
FUNCIONAMIENTO Y PRUEBAS	
5.1 Pruebas de consumo de energía.....	96
5.2 Pruebas de retardo.....	97
5.3 Pruebas de pérdida de paquetes.....	98
 CAPÍTULO 6	
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	
6.1 Consumo energético	101
6.2 Confiabilidad de los datos	104
6.3 Viabilidad técnica de procesos automatizados	109
CONCLUSIONES	112
RECOMENDACIONES.....	114

ANEXOS	116
ANEXO A: Diseño electrónico de los nodos de radiocomunicación.....	117
ANEXO B: Diagrama de bloque de los nodos de radiocomunicación.....	119
ANEXO C: Información detallada del receptor	120
ANEXO D: Información detallada del transmisor	121
ANEXO E: Flotador artesanal.....	122
ANEXO F: Esquema del entorno acuático en interior	123
ANEXO G: Esquema del entorno acuático exterior	124
ANEXO H: Esquema de la red con topología malla.....	125
ANEXO I: Tamaño de muestreo.	128
ANEXO J: Diagrama de flujo de los nodos de radiocomunicación.	129
ANEXO K: Resultados de una red punto a punto en tierra	131
ANEXO L: Resultados de una red punto a punto en entornos acuáticos .	132
BIBLIOGRAFÍA.....	133

ABREVIATURAS

AC	Corriente Alterna (Altern Current).
AES	Estándar de cifrado avanzado (Advance Encryption Standard).
AODV	Vector distancia bajo demanda ad-hoc (Ad hoc On-Demand Vector Distance).
APL	Aplicación (Application).
APS	Subcapa de soporte de aplicación (Application Support Sub-layer).
CCM	Código de autenticación de mensajes con contador mejorado para el cifrado de encadenamiento de bloque (Enhanced Counter with Cipher Block Chaining Message Authentication Code).
CENAIM	Centro Nacional de Acuicultura e Investigaciones Marinas.
CVR	Centro de Visión y Robótica.
DC	Corriente Directa (Direct Current).
DES	Estándar de cifrado de datos (Data Encryption Standard).
DLL	Capa de enlace de datos (Data Link Layer).
DSR	Enrutamiento de origen dinámico (Dynamic Source Routing).
DSSS	Espectro ensanchado de secuencia directa (Direct Sequence Spread Spectrum).
EDGE	Tasas de datos mejoradas para la evolución de GSM (Enhanced Data Rates for GSM Evolution).

EDR	Tasa de datos enganchados (Enhanced Data Rate).
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral.
FHSS	Espectro ensanchado por salto de frecuencia (Frequency Hopping Spread Spectrum).
FIEC	Facultad de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones.
GPS	Sistema de Posicionamiento Global (Global Position System).
GPSR	Enrutamiento sin estado del perímetro codicioso (Greedy Perimeter Stateless Routing).
GPRS	Servicio general de paquetes vía radio (General Packet Radio Service).
GSM	Sistema global para las comunicaciones móviles (Global System for Mobile communications).
GTS	Ranura de tiempo garantizado (Guaranteed Time Slot).
HDR	Encabezado (Header).
HWMP	Protocolo híbrido para redes inalámbricas tipo malla (Hybrid Wireless Mesh Protocol).
IDE	Entorno interactivo de desarrollo (Integrated Development Environment).
IEEE	Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (Institute of Electrical and Electronics Engineers).
ISM	Industria, Ciencia y Medicina (Industrial, Scientific and Medical).
LAN	Red de área local (Local area network).

LTE	Evolución a largo (Long Term Evolution).
MAC	Control de acceso al medio (Medium Access Control).
MIC	Código de integridad de mensajes (Message Integrity Code).
NWK	Red (Network).
OLSR	Enrutamiento de estado de enlace optimizado (Optimized Link State Routing).
OSI	Interconexión de sistemas abiertos (Open Systems Interconnection).
OSPF	Abre primero la ruta más corta (Open Shortest Path First Routing).
PHY	Física (Physical).
PWM	Modulación por ancho de pulsos (Pulse-Width Modulation).
QPSK	Desplazamiento de fase en cuadratura (Quadrature Phase Shift Keying).
RAM	Memoria de acceso aleatorio (Random-access memory).
RF	Radio frecuencia (Radio Frequency).
Rx	Línea de Recepción de Datos.
SAP	Punto de acceso de servicio (Service Access Point).
SM	Modo de sueño (Sleep Mode).
SOFIA	El estado mundial de la pesca y acuicultura (The State of World Fisheries and Aquaculture).

SSP	Proveedor de Servicios de Seguridad (Security Service Provider).
SKKE	Establecimiento de clave simétrica (Symmetric-Key Key Establishment).
SYNC	Sincronización (Synchronization).
TTL	Lógica transistor a transistor (Transistor-Transistor Logic).
Tx	Línea de transmisión de datos.
UART	Transmisor-Receptor Asíncrono Universal (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter).
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones.
UMTS	Sistema universal de telecomunicaciones móviles (Universal Mobile Telecommunications System).
USB	Bus de Serie Universal (Universal Serial Bus).
VDC	Voltaje de corriente directa (Voltage of Direct Current)
VPN	Red privada virtual (Virtual Private Network).
W	Watt.
WAN	Red de área amplia (Wide Area Network).
W-CDMA	Acceso múltiple por división de código de banda ancha (Wideband Code Division Multiple Access).
WIMAX	Interoperabilidad mundial para acceso por microondas (Worldwide Interoperability for Microwave Access).
WMN	Red Inalámbrica tipo malla (Wireless Mesh Network).

WPAN	Red de área personal inalámbrica (Wireless Personal Area Network).
ZC	Coordinador ZigBee.
ZDO	Dispositivo objeto ZigBee.
ZED	Dispositivo final ZigBee.
ZR	Enrutador ZigBee.

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 1.1	Diagrama de flujo de la metodología.....33
FIGURA 2.1	Tipos de Redes Inalámbricas.....40
FIGURA 2.2	Topología Ad-hoc e Infraestructura.....41
FIGURA 2.3	Clasificación de los protocolos de enrutamientos.....44
FIGURA 2.4	Capas del estándar ZigBee50
FIGURA 2.5	Múltiples topologías52
FIGURA 2.6	Seguridad en las capas ZigBee cifrado.....55
FIGURA 3.1	Propagación de la onda electromagnética64
FIGURA 3.2	Primera Zona de Fresnel65
FIGURA 3.3	Topología punto a punto67
FIGURA 3.4	Topología tipo malla67
FIGURA 3.5	Efecto multitrayectoria de transmisiones.....69
FIGURA 3.6	Diagrama de bloques de los nodos principales71
FIGURA 3.7	Diagrama de bloques del repetidor71
FIGURA 3.8	Procedimiento para medir voltaje y corriente72
FIGURA 4.1	Arduino UNO77
FIGURA 4.2	Sensor de temperatura DS18B2079
FIGURA 4.3	Red formada por ConnectPort X481
FIGURA 4.4	Partes del Arduino IDE84
FIGURA 4.5	Configuración en X-CTU.....89

FIGURA 5.1	Canchas de la FIEC-ESPOL.....	93
FIGURA 5.2	Tanques en las Instalaciones del CENAIM	93
FIGURA 5.3	Estanques en la Estación Experimental del CENAIM ..	94
FIGURA 5.4	Diagrama de flujo del saludo del transmisor	97
FIGURA 5.5	Diagrama de flujo del saludo del receptor	99
FIGURA 6.1	Duración de la batería vs frecuencia de monitoreo	103
FIGURA 6.2	Porcentaje de errores vs altura de los módulos	106
FIGURA 6.3	Esquema de la zona de Fresnel entre dos nodos	107
FIGURA 6.4	Temperaturas obtenidas de la red en una piscina	108
FIGURA 6.4	Temperaturas obtenidas de la red en dos piscinas ...	109
FIGURA A.1	Diseño electrónico del transmisor.	
FIGURA A.2	Diseño electrónico del receptor.	
FIGURA B.1	Diagrama de bloques del transmisor.	
FIGURA B.2	Diagrama de bloques del receptor.	
FIGURA E.1	Vista Superior del flotador.	
FIGURA E.2	Vista Lateral del flotador.	
FIGURA F.1	Vista Frontal del entorno acuático en interiores.	
FIGURA F.2	Vista Superior del entorno acuático en interiores.	
FIGURA G.1	Vista Lateral del entorno acuático exterior.	
FIGURA G.2	Vista Superior del entorno acuático exterior.	
FIGURA H.1	Esquema de la red tipo malla en una piscina grande.	
FIGURA H.2	Fotografía de la red tipo malla en una piscina.	

- FIGURA H.3 Esquema de la red tipo malla en dos piscinas grandes.
- FIGURA H.4 Fotografía de la red tipo malla en dos piscinas.
- FIGURA J.1 Diagrama de flujo del transmisor.
- FIGURA J.2 Diagrama de flujo del receptor.

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
TABLA I	Comparación entre protocolo ZigBee y DigiMesh47
TABLA II	Distribución de canales51
TABLA III	Tipos de memorias del Arduino UNO.....78
TABLA IV	Costos de los materiales utilizados.....90
TABLA V	Consumo energético instantáneo de los módulos96
TABLA VI	Tiempo del enlace entre el Tx y Rx98
TABLA K.1	Tiempos en establecer el enlace en tierra.
TABLA K.2	Pérdida de paquetes en el enlace en tierra.
TABLA L.1	Tiempos en establecer el enlace en entornos acuáticos.
TABLA L.2	Pérdida de paquetes en el enlace en entornos acuáticos.

INTRODUCCIÓN

La producción de camarón en Ecuador representa el segundo rubro de ingreso de exportaciones, donde el *litopenaeus vannamei* (camarón blanco) representa el 95% de su producción. Adicionalmente, Ecuador puede ofertar 400 millones de libras anuales de camarón, incluyendo productos de valor agregado [1]. Según datos estadísticos expuestos por la Cámara Nacional de Acuicultura, se obtuvo en el mes de Abril del 2014 un ingreso de \$202.259.494 al país en mencionada actividad [2].

En entornos acuícolas, el crecimiento del camarón se ve afectado por las condiciones climáticas y contaminación del agua [3]. Así mismo, la forma como se cultiva el camarón: cría intensiva, uso indiscriminado de químicos, tóxicos y antibióticos tiene influencia directa en la aparición de enfermedades [4]. Es indispensable el monitoreo continuo de parámetros ambientales y químicos para mantener la calidad del agua en niveles adecuados para el cultivo de camarón. Caso contrario, las enfermedades se pueden propagar rápidamente y generar una caída en los niveles de producción. Según [5] en

2010, 1,7 millones de toneladas de camarón se perdieron en China por contaminación del agua y enfermedades, y en 2011, brotes de enfermedades acabaron con gran parte de la producción de camarón en Mozambique.

El uso de sistemas de monitoreo empleando múltiples sensores para evaluar la calidad de agua en acuicultura ya fue propuesto por Shen et al [6]. Una alternativa de bajo coste para la transmisión de datos es la tecnología Zigbee [7], basada en el estándar IEEE 802.15.4. Un trabajo previo fue presentado en [8], compuesto por varios nodos de sensores y un coordinador. Cada nodo transmite información al nodo coordinador de manera independiente.

Las redes de sensores presentan múltiples ventajas, una de ellas, es el bajo costo de infraestructura al utilizar enlaces inalámbricos. Proporcionan una amplia cobertura y con gran tolerancia a fallos, de modo que si uno de los nodos cae, la red puede auto recuperarse y encontrar rutas alternativas.

La calidad de servicio dentro de una industria acuícola, por su exposición directa al medio ambiente, es de alta importancia llevar un seguimiento de cada uno de sus parámetros y con ello crece la necesidad de tener un mecanismo automatizado que permita obtener los datos de manera ágil. Por

lo tanto los resultados que se obtendrán son de carácter integral, dado que su aplicación puede cubrir varios ámbitos. Al colocar una red inalámbrica de sensores mejoraría el control operativo remoto, reduciendo el riesgo de falla durante el mantenimiento de algún elemento o módulo de la red.

Finalmente, mediante el desarrollo e implementación de un sistema en base a redes inalámbrica de sensores se pretende realizar un control directo y real de las industrias acuícolas, involucrando a ciencias como la electrónica y las telecomunicaciones que han avanzado significativamente y que ofrecen soluciones muy efectivas y eficientes tanto en funcionalidad como en utilidad para monitorear y llevar un control riguroso en este tipo de proceso.

CAPÍTULO 1

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En este capítulo, se describen las bases del estudio planteado. Se detalla la problemática, el “que” existe actualmente; la justificación, el “porque” lo realizaremos, y finalmente, los procedimientos y las restricciones, el “como” se ejecutó el proyecto propuesto. Cabe recalcar, que este proyecto se enfoca según el estado del arte en temas presentados anteriormente pero en medio distinto.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Entornos acuáticos como piscinas, tanques o reservorios son utilizados extensamente en la acuicultura. En esta actividad, parámetros tales como oxígeno disuelto, temperatura, salinidad, entre otros deben ser monitoreados constantemente. Si los parámetros

salen de los rangos establecidos, la producción de cultivos (camarón, tilapia y otras especies) pueden verse afectados negativamente tanto en el crecimiento como en la sobrevivencia [3]. Mediante este estudio se propuso la evaluación de una red inalámbrica de sensores destinada a hacer mediciones automáticas de parámetros ambientales en entornos acuáticos. El uso de redes de sensores para evaluar la calidad de agua en acuicultura ya fue propuesto para diferentes cultivos por Shen et al en [6].

Existieron varios retos al momento de implementar una red inalámbrica de sensores; este trabajo de tesis se enfocó en evaluar dos aspectos del proceso de transmisión inalámbrica en redes de sensores: Consumo energético y calidad del servicio. El primero fue importante por las restricciones de energía que existe en los lugares donde se lleva a cabo la producción, los cuales se encuentran ubicados en la Región Costa de nuestro país. El segundo, garantizó la transmisión de datos, es decir, aseguró que el sistema transmita la información de manera confiable y con una reducida tasa de error [8].

El objetivo del proyecto fue comparar en un entorno real, el consumo de energía y calidad de servicio de arquitecturas de transmisión

inalámbrica en una red de sensores. El sistema experimental consistió en varios nodos, los cuales recibían los datos de su respectivo sensor y los enviaban a una ubicación remota para su análisis.

El sistema experimental se construyó con componentes electrónicos comerciales de bajo costo y son utilizados para diferentes aplicaciones. Las pruebas de campo se realizaron en el CENAIM a varias escalas (laboratorios, tanques, piscinas) y bajo la supervisión del CVR – FIEC, que proveyó con los laboratorios para la construcción del sistema y el procesamiento de los datos.

1.2 OBJETIVO GENERAL

Comparar el consumo de energía y calidad de servicio de una red de sensores en un entorno acuático.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar un sistema experimental de monitoreo ambiental basado en una red inalámbrica de sensores.
- Registrar el consumo de energía y calidad de servicio para varias configuraciones de la red inalámbrica de sensores.

- Evaluar experimentalmente la viabilidad técnica de implementar el sistema en entornos acuáticos.

1.4 JUSTIFICACIÓN

En Ecuador, la acuicultura requiere urgentemente la automatización del monitoreo de parámetros que tienen el potencial de afectar la vida de las especies cultivadas. Uno de los mayores problemas en automatización en entornos acuáticos es el difícil acceso a redes de energía eléctrica y de comunicaciones. Esto ocurre tanto en la producción de larvas como en el cultivo de especímenes adultos, actividades que se realizan en tanques y piscinas respectivamente. La producción de camarón en Ecuador representa el segundo rubro de ingreso de exportaciones, donde el camarón blanco (*litopenaeus vannamei*) representa el 95% de su producción [1].

Las redes de sensores presentan múltiples ventajas, sin embargo su implementación en entornos acuáticos no es trivial debido a las restricciones mencionadas y una de las ventajas que presenta la red a implementar frente a otras redes, es el bajo costo al utilizar enlaces inalámbricos. Además de que se proporciona una amplia cobertura y con gran tolerancia a fallos, de modo que si uno de los nodos cae, la

red puede auto recuperarse y encontrar rutas alternativas [10]. Con esta propuesta se alcanzó de manera eficiente los objetivos, razón por la cual se necesitó el análisis de algunas variables que intervienen para comparación entre sistemas.

Un impulso de este proyecto fue el elevado consumo de energía que se utiliza durante la transmisión de datos; a mayor distancia se presenta mayor atenuación en la señal propagada, y una consecuencia notable por la pérdida de potencia de recepción, es la pérdida de paquete. Existen interferencias provenientes de Wi-Fi, Bluetooth, teléfonos fijos sin cable, entre otras fuentes; que son complicadas en su detección y la mayoría de estas son propias de la banda 2.4 GHz. Por ello, es necesario un sistema que permita un mejor rendimiento en una planta de trabajo [12]. Un ejemplo real es la calidad de servicio dentro de una industria acuícola, debido a que la exposición directa al medio ambiente, es de alta importancia para llevar un seguimiento de cada uno de sus parámetros y con ello, crece la necesidad de tener un mecanismo automatizado que permita obtener los datos de manera ágil. Por lo tanto, los resultados son de carácter integral, dado que su aplicación puede cubrir varios ámbitos. Al colocar una red inalámbrica de sensores se mejorara el control

operativo remoto, reduciendo el riesgo de falla durante el cambio de algún elemento o módulo de la red.

Finalmente, mediante el desarrollo e implementación de un sistema en base a redes inalámbricas de sensores se pretendió realizar un control directo y real de las industrias acuícolas, involucrando a ciencias como la electrónica y las telecomunicaciones, que han avanzado significativamente y que ofrecen soluciones muy efectivas y eficientes tanto en funcionalidad como en utilidad para monitorear y llevar un control riguroso en este tipo de proceso [8].

1.5 METODOLOGÍA

En la Figura 1.1, se ilustra la metodología de este proyecto, la cual se llevó a cabo bajo parámetros tales como el consumo energético de transmisión, la variación del retardo y la pérdida de paquetes, en condiciones de alta exposición a interferencias, obstáculos y se tomó en cuenta uno de los factores más importantes dentro de nuestra investigación, la distancia entre los nodos de la red, utilizando una de las topologías de redes inalámbricas como por ejemplo: punto a punto, malla, estrella, etc.

Se partió de la configuración básica de cada una de las redes, es decir, establecer la línea de base en cada uno de los módulos, así como identificadores, canales, potencia, ciclos de reposo, entre otros, para que exista una comunicación efectiva y la topología adecuada que nos guió a lo largo de este proceso.

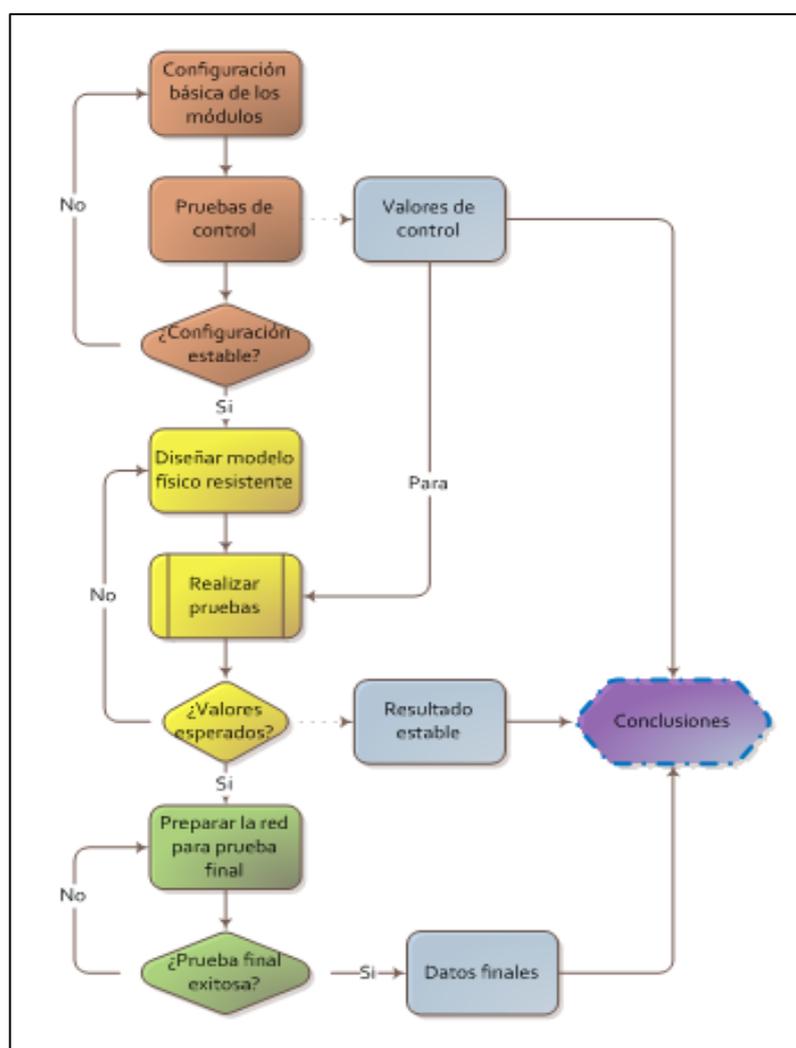


Figura 1.1 Diagrama de flujo de la metodología.

Como siguiente paso, se realizaron las pruebas de control (verificar los datos del fabricante) en medios controlados, estables y de baja interferencia, donde se pudo fijar un punto de referencia y se analizó el comportamiento a pequeños eventos puntuales en periodos de tiempo cortos.

Se planteó un modelo a mediana escala de manera que se obtuvieron datos por medio de la realización de pruebas en un lugar afectado por condiciones acuícolas, menos estables a las anteriores, y así compararlos con la línea base previamente obtenida.

A través del respectivo análisis de datos se procedió a diseñar un modelo para poder llevarlo a la experimentación, es decir, en medios más hostiles en donde puede afectar el ruido, interferencias, temperatura, humedad, golpes, periodos largos de tiempo, entre otros. Se repitió las pruebas de control para observar el impacto con esta variante física y verificar como afecta este diseño a las mediciones con respecto a las pruebas anteriores. Luego, se comprobó la funcionalidad tanto de cada equipo como de la red con la topología establecida.

Finalmente, se recopiló toda la información y se realizó el cálculo total de la aplicación en las diferentes pruebas según los aspectos a analizar tales como el consumo de energía, la máxima distancia entre módulos, la confiabilidad de la comunicación, las aplicaciones y el costo de implementarla.

1.6 RESULTADOS ESPERADOS

Se obtuvo un sistema de redes inalámbricas con topología malla donde se analizó el bajo consumo energético y calidad de servicio de los módulos de comunicación para verificar la viabilidad técnica con el fin de automatizar procesos en las industrias acuícolas.

Se comprobó que los datos llegaban a su destino sin ningún problema e inclusive en diferentes cambios climáticos. Por lo que, se tuvo en cuenta para la confiabilidad de la comunicación, métricas como la variación del retardo y los paquetes perdidos de una red tipo malla en medios acuáticos, así como la adquisición de parámetros de control.

1.7 LIMITACIONES

Las pruebas de campo se realizaron en las instalaciones del CENAIM, ubicadas en la Provincia de Santa Elena en la Comuna San Pedro,

cuyos tanques y/o piscinas constan con separaciones determinadas, fauna variable y medios acuáticos diferentes entre sí.

En el CVR, se llevó a cabo la elaboración del proyecto, es decir, experimentos de laboratorio con los módulos mencionados y elementos requeridos para la adquisición de ciertos parámetros presentes en los lugares a experimentar.

Las condiciones ambientales al momento de realizar las pruebas en las diferentes etapas fueron una variable muy importante a considerar debido a la naturaleza de la misma, la cual puede influir en los componentes electrónicos.

El hardware externo a los módulos de comunicación empleados a la red como los microcontroladores, las fuentes de energía, las placas electrónicas, entre otras, nos condicionaron con respecto la capacidad de la red en su totalidad.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

En este capítulo, se detalla todo lo relacionado a las redes inalámbricas especialmente a la topología tipo malla, dándole un mayor enfoque a la tecnología ZigBee, debido a que utilizamos los módulos XBee DigiMesh para la implementación, la cual nos permitió analizar las características, la arquitectura, protocolos. Además, se identificaron que canales utiliza, como procesa la información en cada capa y sobre todo, método de cifrado que emplea para proteger la misma, para luego, detallar las futuras aplicaciones y determinar si es viable en el medio acuático.

2.1 TRANSMISIÓN INALÁMBRICA DE DATOS

Este tipo de transmisiones se caracteriza por emplear como medio de transmisión el aire, a través de dispositivos como antenas. Una antena

es un dispositivo metálico capaz de radiar y recibir ondas electromagnéticas [9], en otras palabras, estas antenas pueden ser omnidireccionales o direccionales.

Las comunicaciones inalámbricas operan en diferentes rangos de frecuencias. De acuerdo a la frecuencia de operación adquieren ciertas características de las ondas electromagnéticas. Por ejemplo, las ondas de radio no son sensibles a las pérdidas producidas por las lluvias en cambio las microondas terrestres si lo son, en cambio, las microondas satelitales son utilizadas para extensas distancias mientras que la luz infrarroja para cortas distancias.

Las redes inalámbricas se obtienen al unir dos o más nodos sin utilizar cables para la conexión y se logra el intercambio de información mediante la utilización de protocolos. Estos protocolos son originados por organismos internacionales como IEEE y UIT.

Las redes inalámbricas permiten mayor escalabilidad, flexibilidad y sobre todo, es una alternativa viable en zonas donde las redes cableadas no pueden llegar. Estas redes brindan movilidad al usuario dentro del área de cobertura [10]. Sin embargo, cuando la señal se

propaga por el medio, esta propensa a atenuarse debido a ruidos externos como ruido blanco aditivo gaussiano, otras señales transmiten en la misma frecuencia, factores como la lluvia, tormentas eléctricas, entre otras. Por otra parte, se puede adherir al sistema, ruidos internos producidos por los mismos circuitos electrónicos que conforman la red.

Tal y como se observa en la Figura 2.1, las redes inalámbricas se pueden clasificar de acuerdo al área de cobertura. Las redes de área personal inalámbrica tiene alcance muy corto y manejan baja de tasa de bits (envían pocos datos), son utilizadas para conectar varios dispositivos periféricos e involucra poca infraestructura, en cambio, las redes de área local inalámbrica puede cubrir hasta aproximadamente 100m con una velocidad máxima de 54Mbps. Las redes de área metropolitana inalámbrica se basan en el estándar 802.16, utilizando WiMAX puede proporcionar una velocidad máxima de 70Mbps con alcance hasta 10Km, estas redes combinada con las redes inalámbricas de área local (WiMAX + Wi-Fi) conforman las redes inalámbricas municipales, creadas con la finalidad de interconectar distintos servicios públicos. Además, existen las redes de área extendida inalámbrica que tienen una cobertura muy amplia y la velocidad más rápida en comparación con las redes antes

mencionadas, las cuales son generalmente usadas por teléfonos móviles [11].

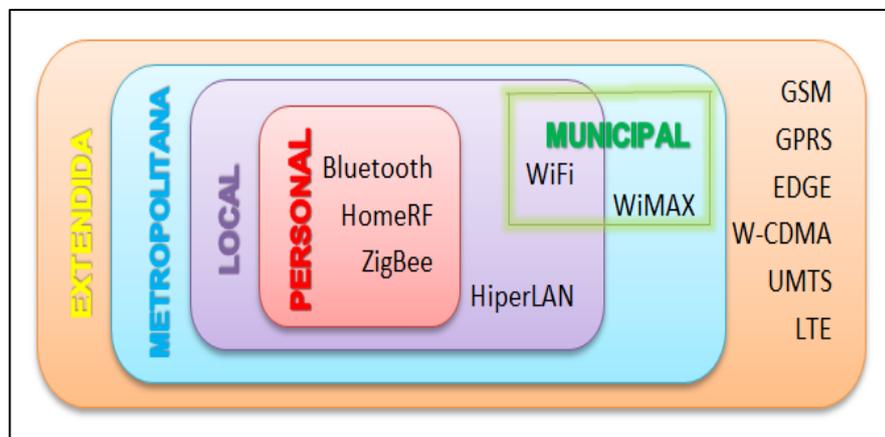


Figura 2.1 Tipos de Redes Inalámbricas.

2.2 REDES INALÁMBRICAS TIPO MALLA

Las redes inalámbricas tipo malla (WMN) pueden ser implementadas con diversas tecnologías inalámbricas utilizando el estándar IEEE 802.11 (Wi-Fi), IEEE 802.15 (Bluetooth), IEEE 802.16 (WiMAX), etc. o combinaciones de más de un tipo.

De acuerdo al estudio realizado por Elio Copas y compañías, la tecnología de las redes tipo mallas poseen numerosos beneficios y demuestra ser una solución innovadora debido a sus bajos costos, robustez, y a su alta flexibilidad, es decir, a diferencia de las otras redes son redundantes, auto-regenerables, auto-configurables [12].

Estas redes mezclan dos topologías, como se ilustra en la Figura 2.2: Ad-hoc e infraestructura.

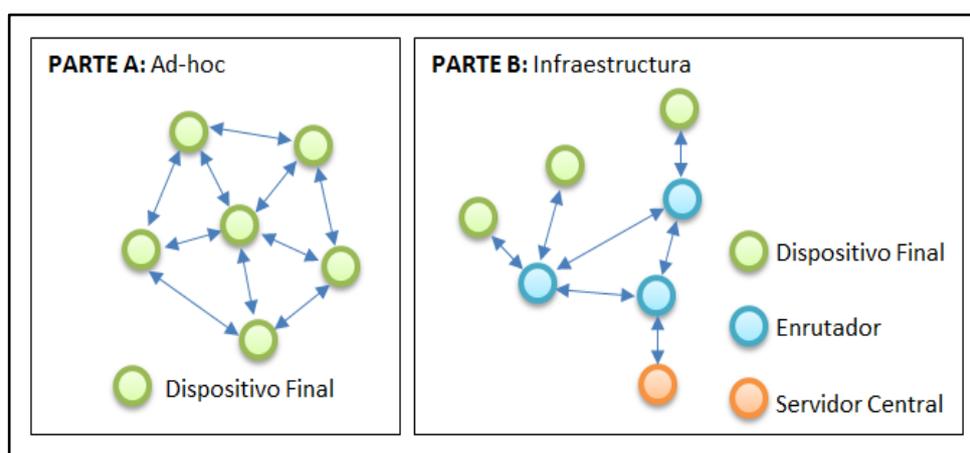


Figura 2.2 Topología Ad-hoc e Infraestructura.

Las redes ad-hoc inalámbricas son redes descentralizadas [13], no se basan en infraestructuras previas como enrutadores o puntos de acceso sino que cada nodo actúa como uno de ellos y envía los datos a otros, la determinación de las rutas se hace de forma dinámica basándose en la conectividad que va surgiendo. Al contrario, en una red inalámbrica con topología infraestructura puede estar descentralizada o centralizada. La red es de tipo cliente-servidor, los nodos actúan como enrutadores permitiendo transmitir datos desde los nodos más cercanos a los nodos vecinos, que están muy lejos de alcanzar en un solo salto, lo que resulta que la red puede abarcar distancias mayores.

En esta red, la información atraviesa múltiples saltos y no es indispensable una unidad centralizada que controle el modo de transmisión porque la comunicación se realiza entre los nodos directamente. Cada nodo puede ser origen y destino de los datos o encaminar la información de otros nodos; al incrementar el número de nodos, no cambia la infraestructura, por lo tanto, se puede incluir un nuevo nodo en cualquier momento y lugar.

Redes inalámbricas tipo malla, tanto para la interconexión de sus puntos como para el acceso de sus usuarios, consta de la siguiente arquitectura: clientes, enrutadores y puertos de enlace.

Los clientes son dispositivos finales que tienen la capacidad de conectarse de manera inalámbrica a una red u otro dispositivo como computadora portátil, teléfonos celulares, entre otras. En cambio, Los enrutadores proporcionan a los usuarios acceso a la red y hacen una comunicación multisalto entre ellos para el correcto direccionamiento y entrega de datos, por otro lado, las puertas de enlace permiten conectarse a Internet u otras redes.

2.3 PROTOCOLOS EN LAS REDES TIPO MALLA

Los protocolos de enrutamiento son algoritmos encargados de escoger la mejor ruta que debe seguir un datagrama para llegar desde su origen a su destino de acuerdo a una métrica. Una métrica es el valor por el cual los protocolos determinan cuál ruta tomar o con cuál nodo comunicarse.

Los principales elementos de enrutamiento sobre los cuáles un protocolo debe basar su funcionamiento son el descubrimiento de nodos, el descubrimiento de frontera, cálculo de rutas y manejo de la red troncal.

El objetivo principal de un protocolo de enrutamiento en la red inalámbrica tipo malla es buscar y establecer una ruta entre los nodos que requieran intercambiar información. En la Figura 2.3, se muestra la clasificación de los protocolos basándose en el modo que descubren las rutas [12].

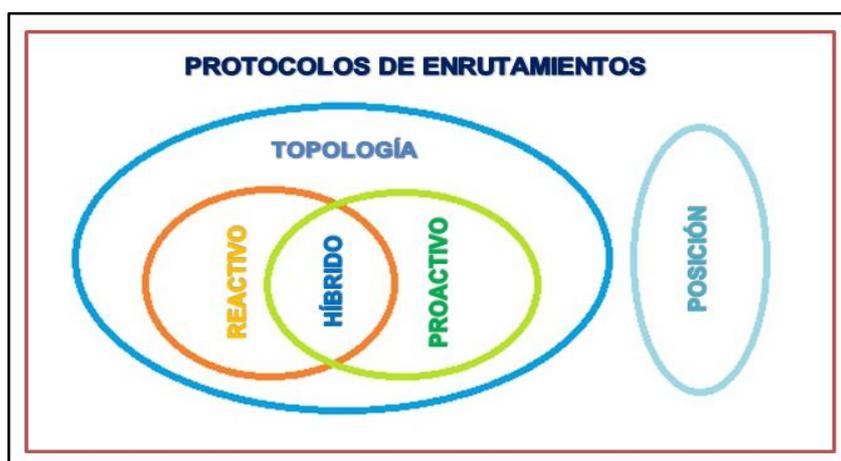


Figura 2.3 Clasificación de los protocolos de enrutamientos.

2.3.1 PROTOCOLOS BASADOS EN TOPOLOGÍA

Estos protocolos seleccionan la trayectoria de los paquetes, basándose en la información topológica de la red. Se clasifican en protocolos reactivos, proactivos e híbridos.

Los protocolos reactivos obtienen información de enrutamiento cuando es necesario, es decir, determinan la ruta cuando existe una petición, el inconveniente es el retardo al descubrir nuevas rutas. Entre los más conocidos están AODV y DSR.

Los protocolos proactivos son basados en tablas de enrutamiento. Tienen un conocimiento exhaustivo del estado de

la red, envían mensajes de control de forma periódica ocasionando sobrecarga en el ancho de banda debido al número de peticiones que se realizan. Los protocolos más importantes que podemos encontrar de esta categoría son OLSR y OSPF.

Los protocolos híbridos surgen de la combinación de los protocolos proactivos y reactivos. La red puede ser modificada de manera dinámica según sus características, en otras palabras, si la red es pequeña y estática, es mejor utilizar protocolos proactivos pero si la red es grande y con movilidad o tiene los caminos pocos utilizados, es preferible usar protocolos reactivos.

2.3.2 PROTOCOLOS BASADOS EN POSICIÓN

Se encargan de seleccionar las trayectorias tomando en cuenta la información geográfica empleando algoritmos geométricos. El paquete es enviado hacia el nodo vecino que está más cercano al nodo destino aunque trate de acercarse a su destino con un enlace definido, no asegura que lo pueda alcanzar. Uno de los

protocolos más usados es GPSR (Enrutamiento sin estado del perímetro codicioso).

2.4 TECNOLOGÍA ZIGBEE

ZigBee es una tecnología inalámbrica para redes de corta distancia, perfecto para entornos con baja relación señal vs ruido compuesta de un conjunto estandarizado de soluciones que pueden ser implementadas por cualquier fabricante basándose en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal, opera en la banda de frecuencias no licenciadas ISM de 2.9GHz y puede transferir datos hasta 250Kbps proporcionando servicio hasta 3.2Km.

Este estándar fue desarrollado para satisfacer la creciente demanda de capacidad de red inalámbrica entre terminales de baja potencia [14]; comunica una serie de dispositivos según la topología de la red que puede ser punto a punto, estrella, malla y árbol, haciendo que el transmisor y receptor trabajen de forma más eficiente entre sí, son útiles para las aplicaciones que requieren bajo coste, pequeños paquetes de información y seguridad en la conectividad y disponibilidad utilizando protocolo de saludo para mejorar la seguridad en las interferencias.

Los módulos que han destacados de la familia ZigBee son fabricados por la empresa Digi International como XBee DigiMesh pero utiliza otro protocolo. En la Tabla I, se muestra las diferencias entre ellos.

Tabla I: Comparación entre protocolo ZigBee y DigiMesh [15].

	ZIGBEE	DIGIMESH
Tipos de Nodos	ZC, ZR y ZED.	Un tipo de nodo.
Opción dormir	ZED.	Todos.
Alcance	Hasta 3,2Km por cada salto.	Hasta 64Km por cada salto (XTend™).
Tamaño de la trama.	Hasta 80 bytes.	Hasta 256 bytes.
Frecuencias y Tasa de datos	2,4GHz (250Kbps). 900MHz (40Kbps). 868MHz (20Kbps).	900MHz (10, 125, 150Kbps). 2,4GHz (250Kbps).
Tolerancia a interferencia	DSSS	900 MHz: FHSS. 2.4GHz: DSSS.
Direccionamiento	Dirección MAC (64 bits) Dirección de red (16bits).	Dirección MAC (64 bits)
Firmware	Hay que actualizarlo.	Solo una versión.

Las características que más destacan de los módulos XBee DigiMesh es que solo tiene un tipo de nodo, no necesitan ninguna jerarquía y cuando no están operando, tiene el estado de dormir para optimizar la batería y conforme van perfeccionando los módulos, el alcance es mayor. En la banda 2.4Ghz operan otros dispositivos y para evitar las

interferencias con esas señales, XBee DigiMesh utiliza FHSS, salto de canal de manera aleatoria y DSSS, dispersa la energía tal manera que otros sistemas la confundan como ruido. En cambio, ZigBee solo emplea DSSS para la codificación.

Estos módulos acceden al medio utilizando CSMA/CA, escucha antes de transmitir y en caso de encontrar el canal ocupado espera un tiempo aleatorio y luego vuelve a escuchar. Proveen conexiones seguras entre dispositivos utilizando 128-bit AES de cifrado y, permiten la asignación opcional de ranuras de tiempo garantizado (GTS) para cubrir la latencia de los dispositivos e incluso utiliza un protocolo asíncrono, half dúplex y estandarizado permitiendo a distintos fabricantes trabajar juntos [16].

2.4.1 COMPONENTES DE LA RED

La red ZigBee está compuesta por tres dispositivos diferentes según su funcionalidad, que son: ZC, ZR y ZED.

- **COORDINADOR:** Organizar la red de área personal.
- **ENRUTADOR:** Interconectar dispositivos de diferente topología de la red, sirve como repetidor porque es el

encargado del enrutamiento de los mensajes mediante múltiples saltos.

- **DISPOSITIVO FINAL:** Es un elemento básico, puede ser un sensor o un actuador; no puede transmitir información destinada a otros dispositivos, por lo tanto, la mayor parte del tiempo pasa en estado “sleep” permitiendo el ahorro de energía.

2.4.2 ARQUITECTURA

ZigBee puede establecer comunicación con otros dispositivos de la red, cumpliendo ciertas reglas necesarias para poder enviar y recibir datos sin ningún inconveniente. La arquitectura del estándar ZigBee solo usa 4 capas, con el objetivo de simplificar la red de baja tasa de transmisión y de bajo consumo energético [17]. En la Figura 2.4, se ilustra cada una de las capas a analizar.

Estas capas trabajan de manera independiente, cada capa es responsable de los servicios ofrecidos a capas superiores; se conecta con las capas adyacentes por medio de un punto de

acceso de servicio (SAP), es el lugar en donde la capa superior solicita los servicios de una capa inferior.

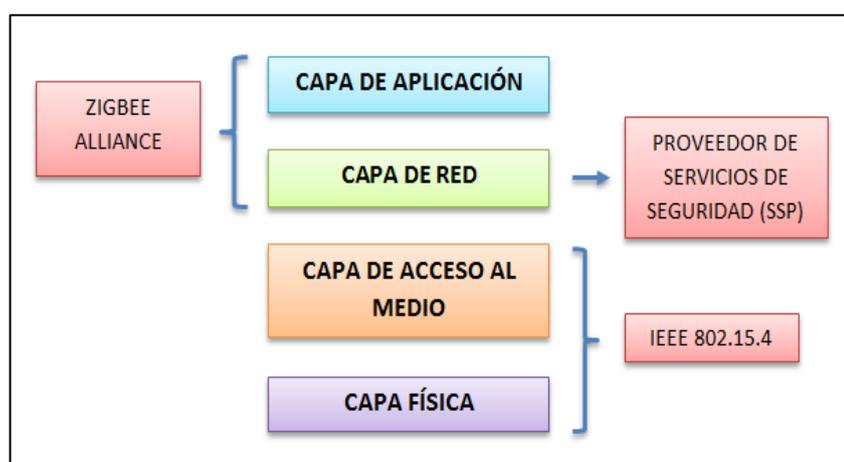


Figura 2.4 Capas del estándar ZigBee [18].

La capa física del estándar 802.15.4 define las frecuencias de radio (RF) que se utilizan para los enlaces, con transferencias en espectro disperso.

La distribución de los canales que utiliza la tecnología ZigBee consta de 27 canales de frecuencia distribuidas en las tres bandas libres [19], cada una se detalla en la Tabla II y se indica la frecuencia central (F_c) que le corresponde.

Esta capa define aspectos necesarios como la potencia del transmisor y la sensibilidad del receptor, el cual se encarga de la transmisión y recepción de los bits a través de los medios de comunicación.

Tabla II: Distribución de canales.

	868 MHz	915 MHz	2400 MHz
Banda	868.0 - 868.6	902.0 - 928.0	2400.0 - 2483.5
N° de canales	1	10	16
F_c (MHz)	868.3	$906.0+2(K-1)$	$2405.0+5(K-11)$
K	0	1 al 10	11 al 26
Región	Europa	EE.UU	Todo el mundo

La capa de enlace de datos (DLL) se encarga de tomar los datos que se obtiene del medio mediante la capa física, chequear la trama y dejar el mensaje sin errores; además regula el flujo de datos, procesa el acuse de recibo que devuelve el receptor al notificar que ha recibir de manera satisfactoria el mensaje enviado.

La capa de red (NWK) tiene como objetivo principal proveer la configuración de la red, implementación de seguridad, manipulación y encaminado de mensajes a su respectivo destino sobre enlace multisalto. El estándar IEEE 802.15.4 soporta múltiples topologías para su conexión en red incluyendo estrella, árbol y malla, como se observa en la Figura 2.5.

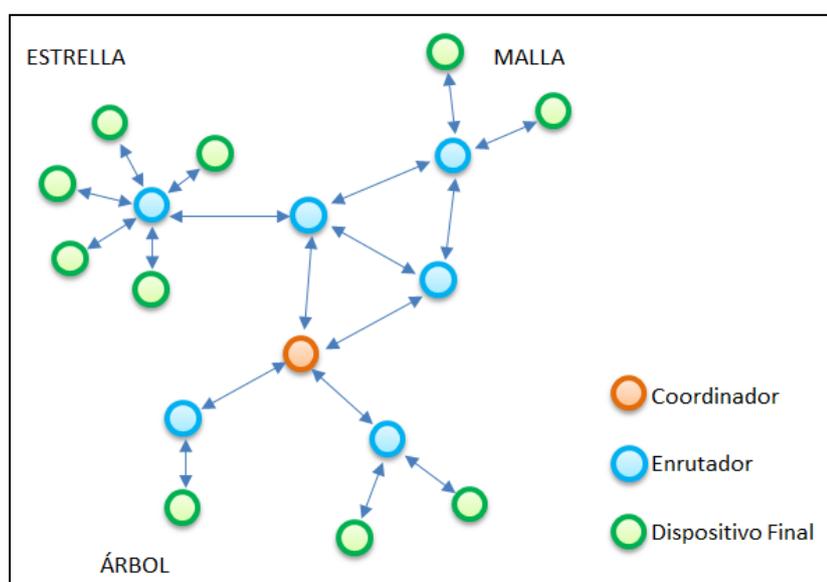


Figura 2.5 Múltiples topologías.

En la capa de aplicación (APL) se inician y/o responden pedidos de enlace y se establece una relación segura entre dispositivos seleccionando un método de seguridad como una clave, también provee las funciones que se quiere implementar en el dispositivo.

La capa de aplicación consiste en:

- **CAPA DE SOPORTE DE APLICACIÓN (APS):** Es responsable de mantener las tablas para para los enlaces y enviar mensajes entre dispositivos asociados.
- **DISPOSITIVO OBJETO ZIGBEE (ZDO):** Define la función del dispositivo en la red ZigBee, es responsable de iniciar y responder peticiones de unión a una red.
- **OBJETOS DE APLICACIÓN:** Estos objetos son definidos por el fabricante que implementa la aplicación.

2.5 SEGURIDAD EN ZIGBEE

Una red de dispositivos ZigBee es una red de tipo inalámbrica; un mensaje puede ser recibido por cualquier dispositivo que se encuentre dentro del rango de cobertura, no se protege la privacidad de los datos.

Esta tecnología soporta el uso de protocolos estándar de encriptación y autenticación con el fin de evitar inconvenientes en ciertas aplicaciones que requieren confidencialidad. La seguridad se basa en claves de enlace y de red.

2.5.1 CIFRADO

ZigBee utiliza Estándar de Cifrado Avanzado (AES) como técnica de cifrado. Hay tres métodos para que los dispositivos puedan adquirir la clave de enlace:

- **PREINSTALACIÓN:** El fabricante embebe la clave en el dispositivo.
- **TRANSPORTE DE CLAVE:** El dispositivo pide a un centro de confianza la clave.
- **ESTABLECIMIENTO DE CLAVE SIN COMUNICACIÓN:** Generar claves al azar. Este servicio se basa en el protocolo SKKE, los dispositivos de destino tienen que tener una clave común.

En la Figura 2.6, se ilustra las capas cifradas: APS, NWK y MAC; son responsables de la seguridad de las tramas, por simplicidad se usa la misma clave para todas las capas.

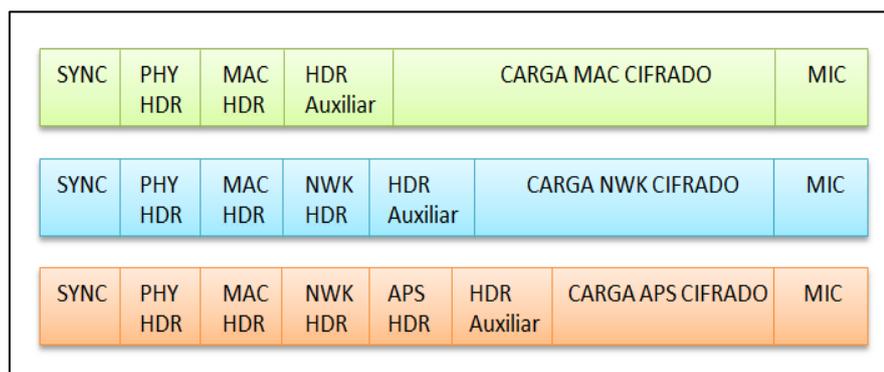


Figura 2.6 Seguridad en las capas ZigBee cifrado [20].

2.5.2 AUTENTICACIÓN

ZigBee soporta autenticación de dispositivos y datos. La finalidad de la autenticación de los datos es asegurar que los mismos sean válidos y comprobar que no sufrieron ninguna transformación.

El transmisor agrega al mensaje un código especial conocido como Código de Integridad de Mensaje (MIC), el cual se genera usando el protocolo CCM; método que conoce tanto al emisor como al receptor. Cuando el receptor recibe el mensaje, calcula el MIC y verifica, si coincide se considera mensaje auténtico.

El nivel de seguridad en el control incrementa con el número de bits del MIC; ZigBee soporta 32, 64 y 128 bits. El CCM se usa en conjunción con AES de 128 bits (AES-CCM) y logra autenticación y confidencialidad en el mensaje pero compartiendo la misma clave de seguridad [17].

2.6 APLICACIONES DE ZIGBEE

ZigBee, ideal para redes estáticas, escalables y con muchos dispositivos, cuyas aplicaciones requieren comunicaciones seguras y maximización de la vida útil de sus baterías, especialmente diseñado para reemplazar la proliferación de sensores o actuadores individuales.

Una de las aplicaciones es la automatización de edificios (inmótica) y hogares (domótica), lugares donde es posible inspeccionar diariamente el consumo de luz, agua y gas mediante un sistema de medición avanzada e inclusive se puede incorporar alertas para notificar cualquier novedad, programar recordatorios, detectar intrusos merodeando la vivienda, es decir, evitar posibles asaltos. Además, es posible crear un control remoto para diferentes aparatos electrónicos, donde la persona puede controlar de manera inalámbrica sin

necesidad de acercarse, por ejemplo, encendido y apagado del aire acondicionado y la calefacción hasta configurar la temperatura.

La automatización industrial ha hecho que el trabajo de los empleados disminuya notablemente con respecto al esfuerzo, ya que, se puede supervisar y monitorear el funcionamiento de las máquinas sin necesidad de estar en el lugar e inclusive se puede modificar ciertos parámetros que pueden estar fallando o simplemente, hay que configurarlos, también es posible registrar en una base de datos el ingreso y salida del personal agregando seguridad en la información al utilizar el escaneo de las huellas digitales, para así, controlar el acceso a áreas restringidas. En cambio, la automatización en los hospitales debe ser indispensable, ya que, las enfermeras no pueden estar las 24 horas con un solo paciente aunque este necesite supervisión permanentemente, es decir, paciente en estado crítico, por ende, no se actúa de manera inmediata cuando surge un eventualidad pero al utilizar esta tecnología, se podrá evitar notablemente estos incidentes, debido a que, se monitoreará los signos vitales, presión sanguínea, saturación de oxígeno de la sangre, pulsación cardíaca, temperatura, peso, etc. a cada momento de manera automática [21].

En la acuicultura, con la ayuda de sensores y otros dispositivos podemos mejorar la seguridad de las instalaciones, al permitir el ingreso sólo de las personas autorizadas para que realicen cualquier inspección e incluso, modifiquen los procesos en los lugares donde se encuentra el cultivo como las piscinas, tanques, etc. Es necesario, monitorizar y controlar diversos parámetros para asegurar que la calidad del agua sea adecuada para la supervivencia de los seres vivos acuáticos, debido a que, la concentración de oxígeno es afectada por: solubilidad de oxígeno, temperatura, salinidad y la presión atmosférica. Por ende, se deben controlar los nutrientes, pH, profundidad, entre otros, factores que están interrelacionados.

CAPÍTULO 3

DISEÑO

En este capítulo, se desarrolló el diseño de la red inalámbrica compuesta por módulos XBee DigiMesh en entornos acuáticos tales como piscinas, tanques o reservorios, lugares donde se realiza la acuicultura, requieren periódicamente un análisis de ciertos parámetros importantes del agua. Esta red tuvo la finalidad de interconectar estos lugares, para obtener dicha información en tiempo real, a bajo consumo de energía y alta calidad de servicio. Por lo tanto, para el diseño se definieron las características y requisitos que debían tener dicha red. Adicionalmente, se detallaron los esquemas de red, los nodos indicando cada uno de los componentes empleados y por último, el costo de todo el prototipo de la red que se implementó para realizar las pruebas que se mencionaran posteriormente.

3.1 CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO PARA REDES INALÁMBRICAS EN MEDIOS ACUÁTICOS

Las redes inalámbricas permiten movilidad dentro del área de cobertura pero son más propensas a sufrir alteraciones. Por ejemplo: la señal se atenúa o inclusive se puede perder en el trayecto debido a los estados del clima (lluvioso, ventoso, nublado). En los entornos acuáticos, se tuvo en cuenta que la onda electromagnética se refracta más que en medios terrestres, por esta razón, la potencia de transmisión disminuye notablemente. La ventaja de este entorno, es que se encuentre en un área despejada, es decir, no se enfrentaron a obstáculos.

Para la implementación de la red WPAN, no se requirió previa infraestructura como estaciones bases, debido a que la radiocomunicación se realizó entre los módulos XBee DigiMesh. Obteniendo una red flexible, escalable, de fácil manejo, y de bajo consumo de energía, debido a que se pudo agregar más módulos cuando se pretendió extender la misma y se ahorró energía empleando el modo pasivo, es decir, disminuyen su potencia por ciertos periodos de tiempo.

Una de las características más importantes para disminuir la pérdida de datos fue tener una red robusta, con redundancia entre nodos. Con esto se obtuvo una red resistente a una caída de enlace, falla o mantenimiento de un nodo en particular, es decir, si fallaba una conexión no se perdía la información sino se redireccionaba debido a que el XBee DigiMesh recibía la información y la enviaba a los nodos más cercanos. Además, la red que se construyó, fue capaz de cubrir las áreas deseadas, utilizaron algunos módulos como repetidores con la finalidad de aumentar el rango de cobertura considerando la distancia máxima entre nodo para obtener una comunicación con un 95% de confiabilidad.

Los nodos de la red estuvieron compuestos por diversos componentes, como por ejemplo: las placas Arduino. Este microcontrolador fue utilizado para procesar la información recibida por los sensores y poder enviarla al exterior. Por lo tanto, se tuvo que considerar el tiempo en que el microcontrolador recibía los datos del buffer, procesaba y esperaba por el siguiente dato.

Esta red transmitió datos a una tasa máxima de 250Kbps ya que adquirió las propiedades de los módulos XBee DigiMesh. En este

proyecto, solo se enviaban datos puntuales de temperatura con la finalidad de probar la funcionalidad de la red, pero los nodos pueden ser capaces de procesar otros parámetros (salinidad, oxígeno disuelto, turbulencia, etc.) dependiendo de qué sensor se incorpore. Adicionalmente, se sugirió el monitoreo constante para analizar el estado de los cultivos acuáticos y evitar pérdidas.

3.1.1 DISEÑO DEL ENLACE

Luego de que se analizó la ubicación de los nodos fue necesario diseñar el enlace, el cual se estableció entre los equipos de comunicación con la finalidad de enviar los datos de manera satisfactoria basándose en dos aspectos importantes que es el tiempo en que demora en establecerse el enlace y el número de paquetes perdidos durante la transmisión.

Al propagarse las ondas electromagnéticas se atenúan, disminuyen su potencia e incluso podría haber pérdida de señal ya sea por reflexión, refracción, difracción o interferencia. Por lo tanto, se trató de mantener despejada la línea de vista, propagación directa entre el transmisor y receptor, como se muestra en la Figura 3.1.

Cuando la onda incide sobre un punto de la frontera entre dos medios de diferentes permeabilidad y permitividad, se refleja una parte o toda la señal, la cual se propaga en el mismo medio pero se aleja del plano de dispersión y se refracta al cambiar de dirección cuando pasa de un medio a otro, si la incidencia es desde un medio dieléctrico (aire) a un conductor (agua), el aumento de la conductividad hace que el ángulo de refracción disminuya. En entornos terrestres la conductividad es menor que entornos acuáticos, que contienen agua de mar, siendo de 0.001S/m y 5S/m respectivamente.

La cantidad de pérdida de potencia por absorción depende de la frecuencia y el material. Para las microondas, hay dos materiales muy absorbentes que son el metal y el agua. En este caso, el obstáculo principal es todo lo que contenga agua, ya que las ondas provocan que las moléculas de agua se agiten, capturando algo de energía [22]. Pero al transmitir a baja potencia (1mW), el efecto tiende a reducirse.

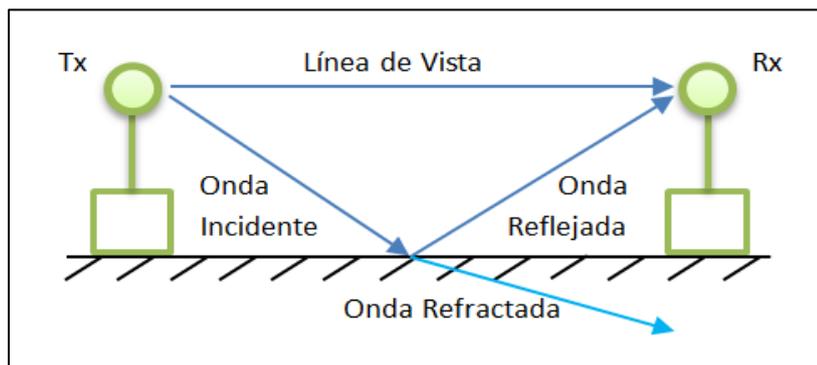


Figura 3.1 Propagación de la onda electromagnética.

La difracción sucede cuando existe la presencia de obstáculos en intermedio de los equipos transceptores haciendo que se desfase la señal, y por último, la interferencia es la superposición de señales que se transmiten en la misma banda de frecuencia [23].

Para tener un buen enlace, también se tuvo que considerar la zona de Fresnel, volumen elipsoidal que se encuentra alrededor de la línea de vista y en sentido transversal, un círculo, como se observa en la Figura 3.2. El primer radio se puede calcular empleando la Ecuación 3.1, la cual debe estar 100% libre de obstáculos en el mejor de los casos y aceptable hasta un 60%, cuando la separación entre el transmisor y receptor es grande se debe tomar en cuenta la constante de curvatura de la tierra

cuyo valores son de 4/3 y 2/3 respectivamente [24], pero en el proyecto no se consideró ya que la distancia fue menor a 100m, por lo tanto, se asumió una línea recta.

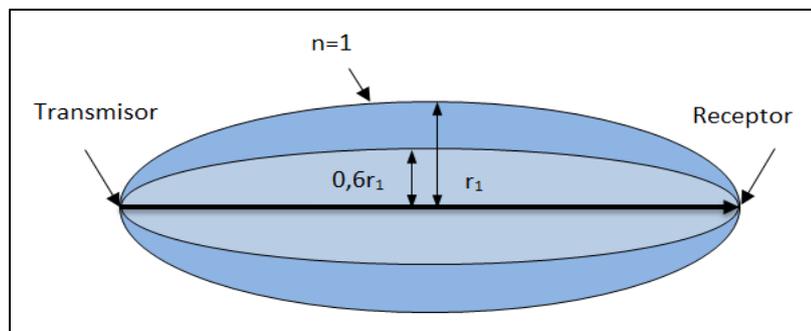


Figura 3.2 Primera Zona de Fresnel [24].

El radio de la zona de Fresnel se calcula con la Ecuación 3.1:

$$r_n \approx \sqrt{\frac{ncd_1d_2}{fd}} \quad (3.1)$$

Para utilizar esta fórmula es necesario definir: constantes como la velocidad de la luz (c), la frecuencia de operación (f) y la distancia del enlace (d); variables como distancias (d_1, d_2) dependen de la ubicación del obstáculo y, por último, el valor n ésimo (n) varía según el radio (r_n) que se desea encontrar, pero para tener un buen enlace, es necesario tener despejado

por lo menos el primer radio de la zona de Fresnel (r_1), por consiguiente, el valor sería 1.

La pérdida del espacio libre (L_F) es la disminución de la potencia a lo largo del trayecto, siendo indispensable en cualquier sistema de radiocomunicación ya que la onda viaja en el aire, cuyo valor puede ser obtenido empleando la Ecuación 3.2; también depende de la frecuencia y la distancia del enlace.

$$L_F(\text{dB}) = 32.4 + 20 \log(d[\text{Km}]) + 20 \log(f[\text{MHz}]) \quad (3.2)$$

3.1.2 ESQUEMA DE LA RED

De acuerdo a la inspección realizada en las instalaciones del CENAIM, se decidió proponer dos diseños los cuales tienen las siguientes topologías:

PUNTO A PUNTO: Útil en las piscinas pequeñas de camarones, como se muestra en la Figura 3.3. Pero se requirió que los módulos se encuentren a una gran altura por el obstáculo que hay entre piscinas.

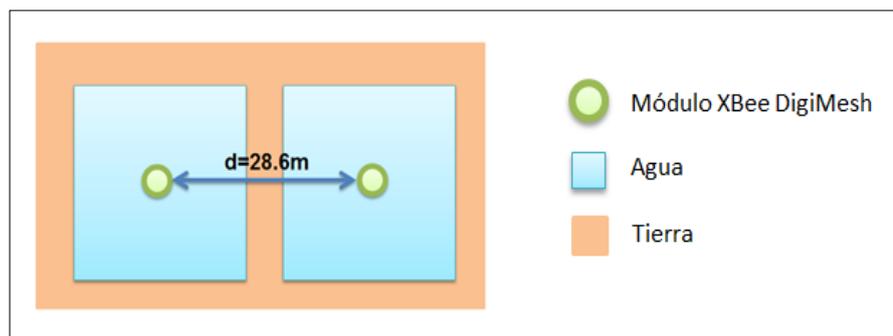


Figura 3.3 Topología punto a punto.

MALLADA: Ideal para las piscinas más grandes donde se realiza el cultivo de tilapias y se necesitó varios nodos dentro del área para poder cubrirla, como se ilustra en la Figura 3.4. Para la adquisición de los datos obtenidos desde las topologías mencionadas por medio de un teléfono inteligente o una PC, existieron tres opciones: Puerta de enlace (ConnectPort X4), Bluetooth o Puerto serial con un módulo XBee.

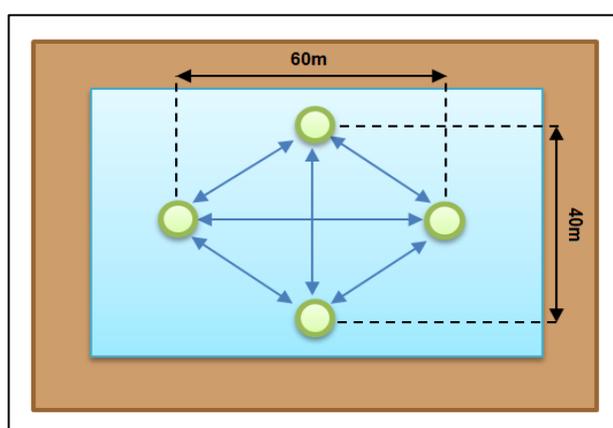


Figura 3.4 Topología tipo malla.

3.2 REQUISITOS PARA EL DISEÑO DE LA RED

Los requisitos para el diseño de la red inalámbrica eran derivados de la cantidad de datos a transmitir y del entorno en el que se va trabajar.

Los módulos XBee DigiMesh trabajan en la banda de frecuencia libre de 2.4GHz, la cual es muy utilizada por los dispositivos en la actualidad, desde celulares y Wi-Fi hasta el mismo microondas casero, razón por la que los XBee envían la señal en espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS) permitiendo así no provocar interferencia entre ellos.

Una opción que brindan los módulos utilizados, XBee DigiMesh, es la de poder cifrar la información para mayor seguridad (AES-128) pero a costo de disminuir la transmisión de los datos por unidad de tiempo.

La multitrayectoria, efecto provocado por las diferentes rutas que puede tomar la señal desde el nodo de transmisión hasta el de recepción. En la Figura 3.5 parte A, se ilustra la multitrayectoria por hardware, por la reflexión de la onda electromagnética en diferentes superficies, y en la parte B por software, los saltos que realiza el paquete entre nodos hasta llegar a su destino.

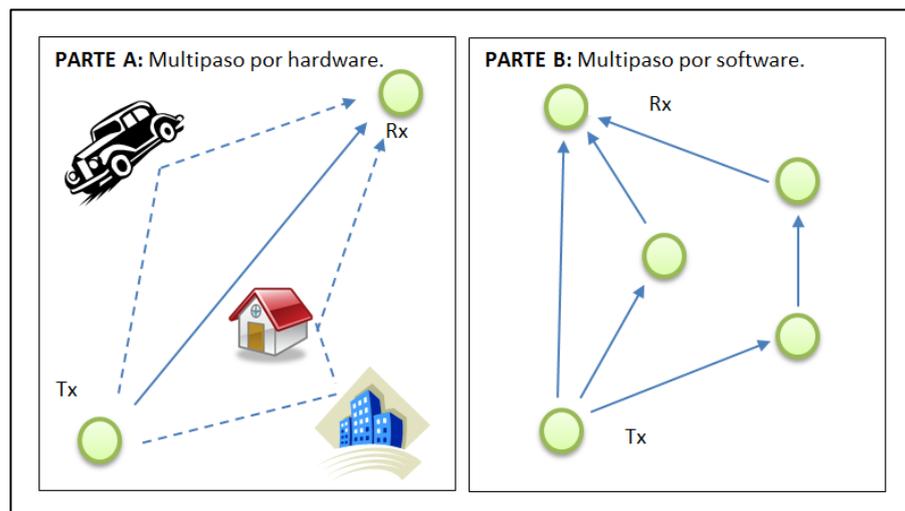


Figura 3.5 Efecto multitrayectoria de transmisiones.

Existieron tres maneras de disminuir este efecto, la primera forma fue la de aumentar la potencia de transmisión y recepción; la segunda, fue disminuyendo la velocidad de los datos y por último, direccionar el mensaje (el ConnectPort X4 se encargó de aquello).

Al incluirle el microcontrolador, se pudo realizar operaciones para determinar el funcionamiento de la red, como por ejemplo: el cálculo del número de errores y el retardo en cada transmisión. Para ello, se tuvo en cuenta el tamaño de los mensajes porque su buffer estuvo limitado (64B) y el tiempo entre mensajes, descartando así el exceso hasta su respectivo procesamiento tales como la adquisición, el almacenamiento y la comparación de los datos. Adicionalmente, con el

microcontrolador se añadió más confiabilidad en los datos para cada una de las transmisiones al agregarle un acuse de recibo (acknowledgement) personalizado.

3.3 DISEÑO ELECTRÓNICO

Este proyecto utilizó mínima cantidad de hardware ya que las partes más importantes del diseño de los nodos fueron: el Arduino y el módulo XBee. Adicionalmente, se agregaron pulsadores para poder realizar manualmente una de las funciones ya determinada en el código de cada Arduino como: iniciar el envío de datos, mostrar los resultados del enlace, entre otras. También, con la incorporación del módulo Bluetooth, se pudo acceder a dichas funciones mediante comandos programados desde una PC o un Celular. Además, se adjuntó a la placa unos indicadores (LED, zumbador), para monitorear el proceso y dar señal de alarma, al momento de terminar la orden asignada.

El nodo transmisor y receptor, como se ilustra en la Figura 3.6, estuvieron formados por los mismos componentes: módulo XBee DigiMesh, Arduino y periféricos. En los Anexos [A-B], se muestra los

diseños electrónicos y el diagrama de bloque de cada los nodos de radiocomunicación.

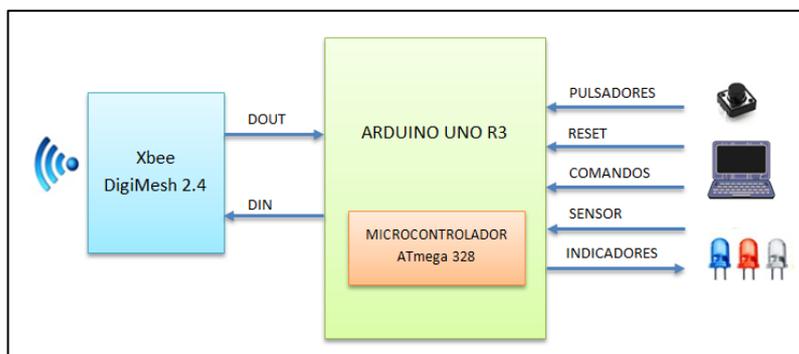


Figura 3.6 Diagrama de bloques de los nodos principales.

Los repetidores solo reenviaban la información y estuvieron compuestos básicamente de un módulo XBee DigiMesh y una fuente de alimentación. Pero, algunos de ellos, como se muestra en la Figura 3.7, se les agregó un módulo de Bluetooth Shield v1.2 y un Arduino; con la finalidad de poder capturar los datos del sensor o reportar el funcionamiento de la red, y así, conocer los retardos de la transmisión y los errores que hubieron en la recepción y poder enviar comandos desde un dispositivo inteligente.

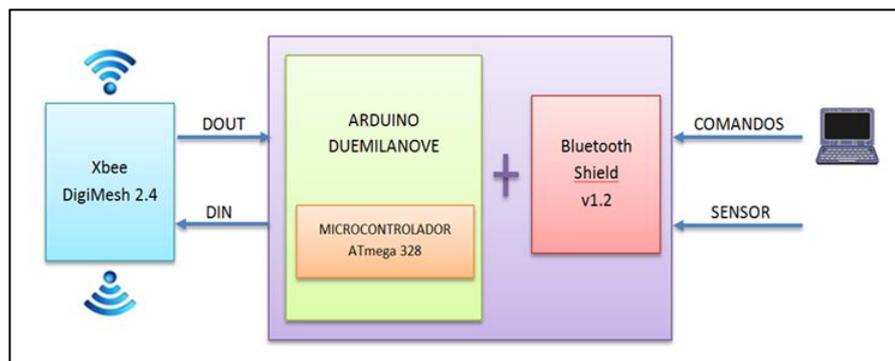


Figura 3.7 Diagrama de bloques del repetidor.

3.4 DISEÑO DE PRUEBAS

Tal y como se muestra en la Figura 3.8, para obtener el consumo energético instantáneo se conectó dos multímetros en cada módulo de transmisión, uno en paralelo para medir voltaje, y otro en serie para medir corriente. Con los valores puntuales conseguidos, calcular el consumo del XBee en cada uno de los modos que poseen.

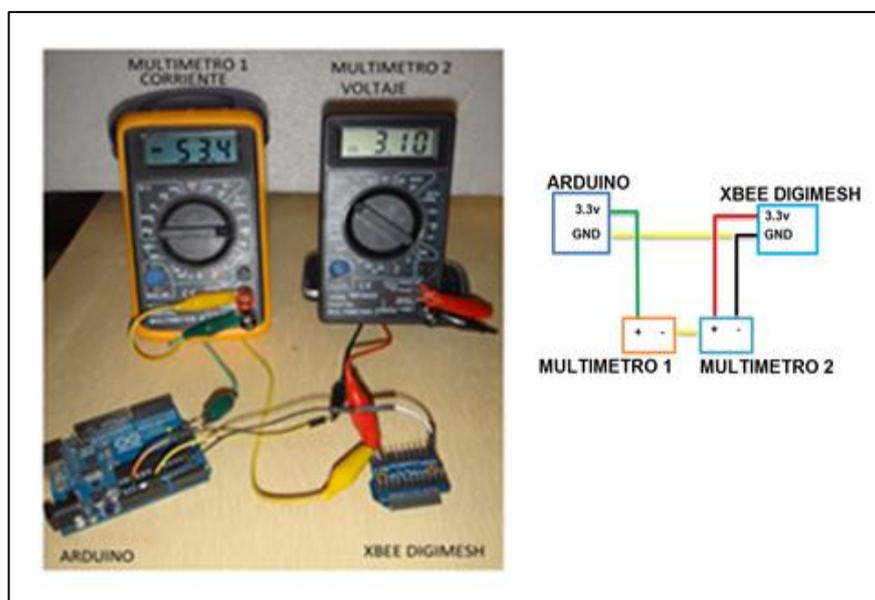


Figura 3.8 Procedimiento para medir voltaje y corriente.

Se empleó el software Arduino 1.0.1 para escribir dos códigos, uno para el transmisor y otro para el receptor, cuyas funciones se muestran en los Anexos [C-D]. Al usar módulos de Bluetooth en los repetidores se graba un programa, el cual consiste en transmitir lo que recibe a un dispositivo final y viceversa.

En el código de los transceptores, se definió principalmente el tamaño del mensaje y el número de repeticiones del envío. Se consideró los tiempos de procesamiento del microcontrolador de la placa de Arduino, por lo que, el tamaño del mensaje se fragmento en varios paquetes de 32 bytes cada uno. En el receptor, se fijó el tamaño del mensaje y se esperó a que termine la transmisión para que “todos los paquetes” llegaran, para así, poder calcular los mensajes fallidos.

El transmisor fue el encargado de establecer el enlace. Para ello, se tomó el tiempo inicial ($t_{inicial}$) cuando se envió el mensaje de saludo al receptor, y el tiempo final (t_{final}) cuando este respondió con un mensaje de confirmación. Se empleó la Ecuación 3.3, para calcular el tiempo del enlace (t_{enlace}):

$$t_{enlace} = \frac{t_{final} - t_{inicial}}{2} \quad (3.3)$$

Como los mensajes de saludo recorrieron la misma distancia, el tiempo obtenido en el transmisor se divide para dos.

Se analizó la red punto a punto para obtener las condiciones seguras de buena comunicación, las cuales se basaron en tiempo de enlace, perdida de mensajes, alcance entre cada nodo y a que altura deben tener la antena. Con esta información, se armó la red con topología malla.

CAPÍTULO 4

IMPLEMENTACIÓN

En este capítulo, se detalla las características de cada componente y dispositivo que se utilizó para el diseño de la red. Adicional, se da una previa introducción de los softwares y pautas para configurar cada uno de los programas que se empleó en la implementación de la red, los cuales fueron de simple manejo para el usuario y permitieron realizar programas personalizados según la necesidad.

4.1 HARDWARE

En el proyecto, se utilizó varios componentes como placas de Arduino, para procesar la información recibida por los módulos XBee DigiMesh, cuyas características se describieron anteriormente (Ver Tabla I) y

obtenida por los sensores de temperatura, un factor muy importante para la vida acuática, ya que son animales acuáticos que no resisten intensos cambios de temperatura, por esa razón, aceleran los procesos metabólicos para adaptarse al medio, como consecuencia, perjudican directamente al oxígeno disuelto y la fuente de comida.

Para la adquisición de datos de manera inalámbrica entre los módulos XBee DigiMesh y PC, se puede incorporar a la placa Arduino un módulo Bluetooth Shield v1.2, utilizando dos pines digitales como Software UART, este funciona como transceptor en la banda de 2.4GHz y se puede configurar en tres modos diferentes como maestro, esclavo o loopback para redireccionar el tráfico. También, se accedió por medio de una puerta de enlace (ConnectPort X4), el cual se detallará más adelante.

4.1.1 MICROCONTROLADOR

Arduino tanto hardware como software son de fácil acceso y manejo, permiten crear interesantes prototipos electrónicos [25]; está compuesto por una placa con un microcontrolador, puertos de entradas analógicos y digitales, utilizados para capturar la información del entorno, y puertos de salidas

digitales que son utilizados para activar indicadores (LED, zumbador), permitir la comunicación con otros módulos, proporcionar PWM, entre otros.

Existen diversos modelos de placas Arduino como UNO, Duemilanove, Mega, Nano, LilyPad, etc., cada uno diseñado para satisfacer diversas necesidades de los usuarios. En la Figura 4.1, se muestra el Arduino a utilizar en la implementación. Utiliza un microcontrolador ATmega328, posee catorce puertos digitales (seis de ellos pueden proveer salida PWM), seis puertos de entradas analógicas y tres tipos de memoria, que se detallan en la Tabla III. Además, funciona con un reloj de 16MHz.



Figura 4.1 Arduino UNO [25].

Tabla III: Tipos de memorias del Arduino UNO.

ARDUINO UNO		
MEMORIA	FUNCIÓN	CAPACIDAD
Flash	Almacenar el código del programa	32KB Gestor de arranque 0.5KB
SRAM	Crear y manipular las variables cuando se ejecuta	2KB
EEPROM	Almacenar información a largo plazo	1KB

Esta placa puede ser alimentada vía conexión USB, una batería o un adaptador AC-DC. Cada pin digital puede proporcionar o recibir máximo 40mA conectado a 5V y 50mA a 3.3V, dispone de resistencias pull up internas de 20 K Ω a 50K Ω que por defecto están desconectadas. Las señales analógicas se convierten en digitales con una resolución de 10 bits; entregando valores de 0 a 1023 proporcionales a los voltajes comprendido entre 0 y 5 voltios. Este valor máximo puede ser modificado externamente utilizando el pin AREF.

Existen pines: Rx y Tx, usados para realizar transmisiones, es decir, permiten la comunicación entre el Arduino y un

dispositivo. Arduino UNO no utiliza Atmega16U2 programado, el cual canaliza la información a través del USB al computador, utilizando los controladores COM USB estándar.

4.1.2 SENSOR DE TEMPERATURA

En la Figura 4.2, el termómetro digital DS18B20, de Dallas Semiconductor, consta de tres pines: Fuente de alimentación, Dato de entrada/salida y tierra. Este sensor reporta la temperatura en Celsius en un tiempo máximo de 750ms con una resolución digital de 12 bits equivalente a 0,0635°C.

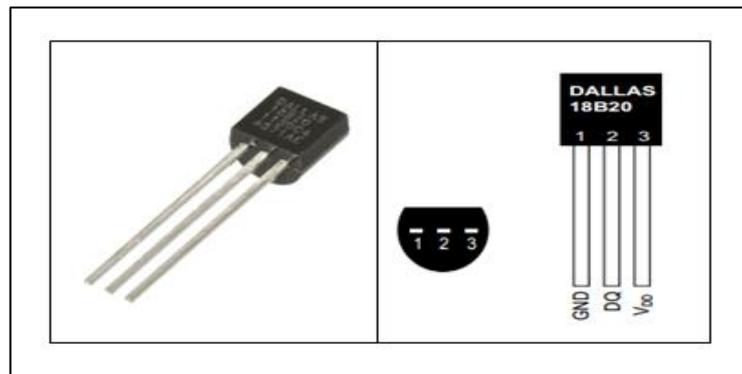


Figura 4.2 Sensor de temperatura DS18B20 [26].

Para la comunicación entre el sensor y el microprocesador central se requiere solo una línea de datos. Su rango de temperatura operativo es de -55°C a +125°C con una exactitud

de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$. Adicionalmente, el DS18B20 puede obtener energía directo de su línea de datos (“energía parasita”), eliminando la necesidad de una fuente externa, a costo de reducir ciertas funciones de programación [26].

4.1.3 PUERTA DE ENLACE

En la Figura 4.3, ConnectPort X4 es una puerta de enlace, fabricada por la empresa Digi International, la cual proporciona la funcionalidad de puerta de enlace entre distintas tecnologías de red como Ethernet, celular, Wi-Fi y XBee. Realizan conectividad de red IP entre ellos, es decir, la puerta de enlace recolecta los datos de los nodos, procesan y luego, envían solicitud mediante las conexiones ya mencionadas. Este dispositivo actúa como coordinador en una red tipo malla porque contiene una interfaz Zigbee/802.15.4 integrado que permite controlar y administrar la red, por ende son compatibles con los módulos XBee.

Las principales características de ConnectPort X4, es que permite flexibilidad en la red al poder integrar varias redes en una conexión y comunicación de extremo a extremo entre

dispositivos finales, incluyen protocolos IP integrales y soporte IPsec VPN en conexiones WAN con DES, 3DES o AES de cifrado para enrutamiento de alta calidad y seguridad, AES-128 en redes malladas. Adicional, se puede incorporar GPS de manera externa ya que este dispositivo no tiene incluido.

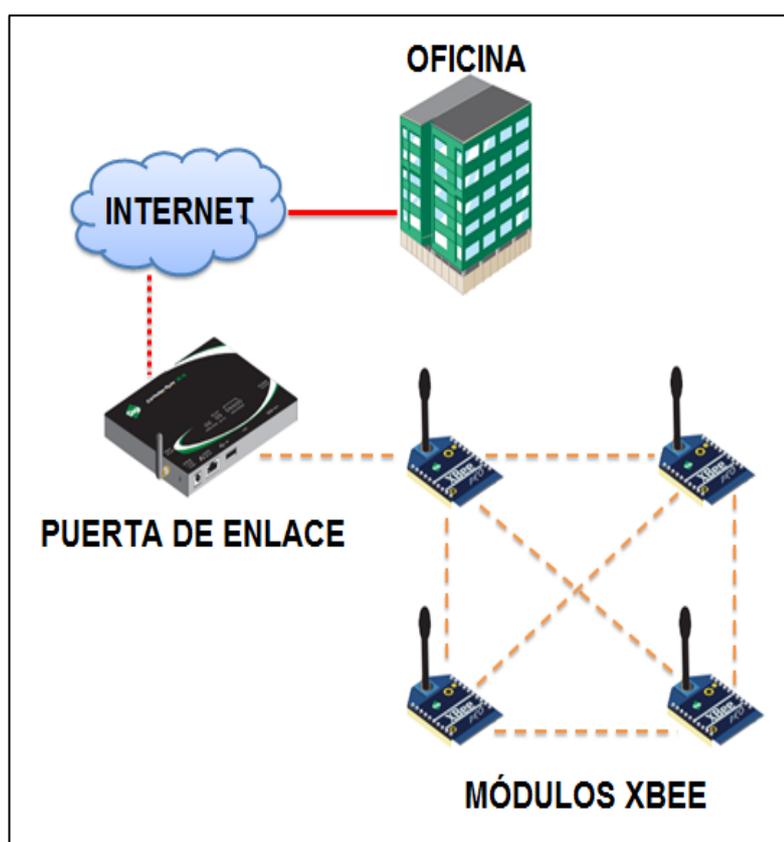


Figura 4.3 Red formada por ConnectPort X4 [27].

Este hardware posee dos memorias que son: RAM y FLASH de 8MB y 4MB respectivamente, la frecuencia de operación es de 2.4GHz con una tasa máxima de datos de 54Mbps, puede ser

alimentada por 6-30VDC y la temperatura de funcionamiento puede ser de -30°C a 70°C. Cada dispositivo soporta el entorno de desarrollo Python, fácil de usar ya que el lenguaje de programación permite el control y manejo de las conexiones y datos de aplicaciones personalizadas [27].

4.2 SOFTWARE

A continuación, se detalla cada uno de los softwares que se empleó en la implementación de la red como Arduino versión 1.0.1, en el cual se escribió el código del programa para que realice el procesamiento de la información y los respectivos análisis para luego grabar en la placa de Arduino; X-CTU, nos permitió observar y modificar ciertos parámetros de los módulos XBee e inclusive proporcionar el alcance entre dos de ellos, es decir, punto a punto y Digi Python, lo cual permitió configurar el ConnectPort X4.

4.2.1 SOFTWARE PARA EL MICROCONTROLADOR

Arduino 1.0.1, es un software que permite programar el microcontrolador, que se encuentra en la placa Arduino, desde cualquier computador empleando cable USB 2.0 tipo B, se

puede implementar mediante el uso del entorno interactivo de desarrollo (IDE) propio de Arduino.

El Arduino IDE sirve principalmente para crear, abrir y modificar el código del programa [28], la estructura del mismo consta de dos partes fundamentales: `Setup()`, se encuentra al inicio y se puede configurar los pines, la comunicación serial, etc. y `loop()`, lugar donde se encuentra el código que se debe ejecutar, es decir, se podrá capturar información del exterior, modificar las salidas, etc. El lenguaje de programación de Arduino se basa en C/C++ e incluye funciones y librerías predeterminadas para simplificar el código.

Arduino 1.0.1, se puede descargar de manera gratuita incluyendo los drivers FTDI (Future Technology Devices International) necesario para la programación y reconocimiento del puerto dependiendo de la placa a utilizar. El IDE se basa en procesamiento/cableado. En la Figura 4.4, se observa las partes más importantes del Arduino IDE.

Compilar, es el proceso que convierte las instrucciones antes de que el código del programa se envíe a la placa; cargar, compila y luego transmite por conexión USB, es decir, graba el código en el microcontrolador; mensajes de la consola, muestra lo que el IDE está haciendo y mensajes de error; monitor serial, permite enviar información textual de la placa y el tab menú, permite crear varios archivos en el sketch.

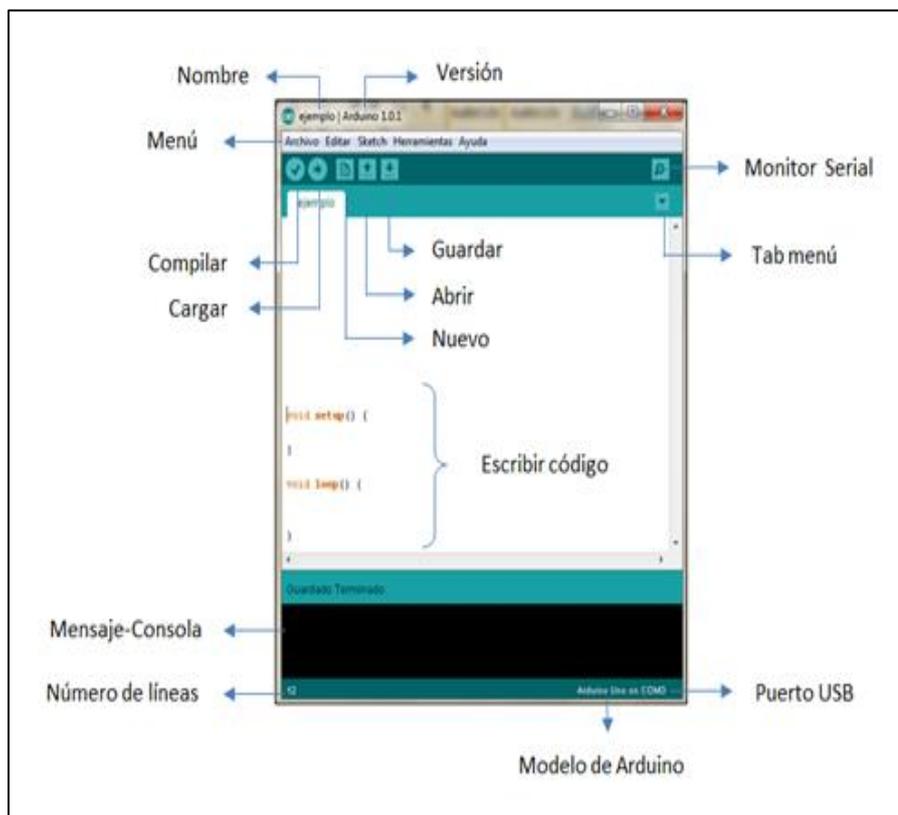


Figura 4.4 Partes del Arduino IDE.

4.2.2 SOFTWARE PARA LOS MÓDULOS DE TRANSCÉPTOR.

Digi International ofrece una herramienta conveniente para la programación de los módulos XBee DigiMesh. Con este software, X-CTU, el usuario será capaz de actualizar la versión de los módulos, asignar parámetros, lograr pruebas fáciles de comunicación.

Antes de poder hablar con el XBee, se necesita un adaptador USB. Con este adaptador se puede comunicar a través de un "Puerto Serial USB", los cuales se van aumentando con cada adaptador que se conecte a la computadora, mas no por XBee.

El X-CTU tiene cuatro pestañas principales que son:

- **AJUSTE DE PC:** Se puede configurar la PC para dialogar con el XBee u otro dispositivo utilizando una interfaz serial. También se puede probar y verificar si el XBee está trabajando apropiadamente.
- **PRUEBA DE RANGO:** Luego de que la configuración de la PC sea correcta y el XBee haya sido conectado a otro, entonces se puede utilizar esta función. Esta da una

noción de cómo está la fuerza de la señal, como esta su tasa de éxito para enviar o recibir información.

- **TERMINAL:** Con la programación adecuada en el ajuste de PC, se puede utilizar este simple terminal para conversar con el XBee o dispositivo conectado con interfaz serial.
- **CONFIGURACIÓN DE MODEM:** Una muy buena interfaz para leer o escribir los parámetros de un XBee. Se puede actualizar la versión del módulo e incluso se puede cambiar la función del módulo de acuerdo a la red.

4.2.3 SOFTWARE PARA LA PUERTA DE ENLACE

Python es un lenguaje dinámico, orientado a objetos que puede ser usado para el desarrollo de una amplia gama de aplicaciones de software, desde programas simples para aplicaciones integradas más complejas. Incluye bibliotecas extensas y funciona bien con otros idiomas. Un verdadero lenguaje de código abierto, Python se ejecuta en una amplia gama de sistemas operativos, como Windows, Linux / Unix, Mac OS X, OS / 2, Palm Handhelds, y los teléfonos móviles de Nokia.

Digi incorpora el entorno de desarrollo Python dentro de cada puerta de enlace ConnectPort X, permitiendo a los clientes un estándar verdaderamente abierto para el control completo de las conexiones de los dispositivos, la manipulación de los datos, y las acciones basadas en eventos [29].

Para iniciar en el programa se recomienda utilizar la guía, ya que le dará una estructura básica completa de la forma en que se debe manejar el mismo.

La programación se da en lenguaje Python, por lo que las recomendaciones y ayudas se las busca así y no como Digi Python que es un software direccionado a estas puertas de enlace.

4.3 CONFIGURACIÓN

Los softwares utilizados fueron de fácil manejo pero requirieron una configuración previa al uso, por ende, se señala las configuraciones más relevantes de cada uno, especificando paso a paso la forma de cómo se realizaron. Por ejemplo: Para grabar el código del programa en la placa de Arduino, se tuvo en cuenta que tarjeta y puerto serial se

empleó, así como el X-CTU permitió obtener comunicación con los módulos XBee.

4.3.1 CONFIGURACIÓN DEL ARDUINO IDE

En el Arduino IDE se debe configurar tanto el modelo de la placa y el puerto serial a utilizar, seguido de conectar la placa de Arduino al computador. A continuación, se detallan los pasos a seguir:

- Herramientas>>Tarjeta>>Selecciona el modelo de la tarjeta.
- Herramientas>>Puerto Serial>>Selecciona el puerto COM.

4.3.2 CONFIGURACIÓN DE LOS XBEE EN X-CTU

La configuración de los XBee en el X-CTU se puede dividir en dos partes principalmente:

La primera parte es la comunicación serial entre el XBee y la PC (en la pestaña “Ajustes de PC”) donde los parámetros

deben estar Baud=9600, Parity=NONE y deseleccionada la casilla del API.

En la segunda parte tenemos la pestaña configuración de modem (o equipo) en la cual antes de comenzar se debe pulsar el botón de nombre “Leer”. En la Figura 4.6, se observa que los valores de “ID” y “CH”, estos deben ser iguales en cada XBee a utilizar ya que es el nombre y el canal de la red respectivamente.

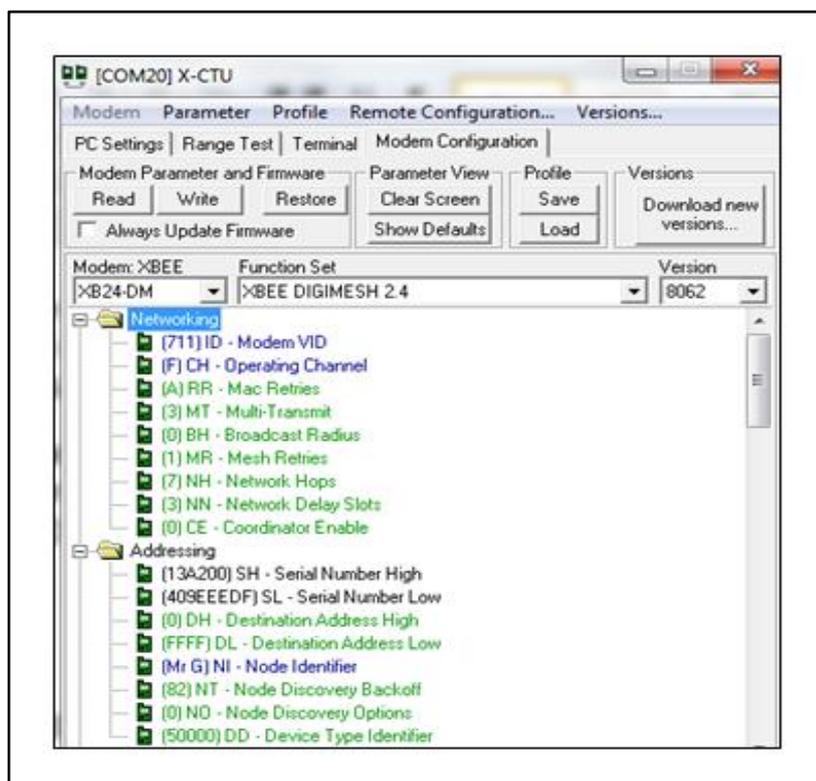


Figura 4.5 Configuración en X-CTU.

Los parámetros DH=0 y DL=FFFF indican que el mensaje destino se enviara en “broadcast” (a todos los nodos cercanos). Finalmente el valor PL que ajustara la potencia según la distancia entre los equipos.

4.4 COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN

La red inalámbrica compuesta por módulos XBee, consistió en dos diseños como se mencionó en el capítulo anterior, la topología punto a punto y tipo malla pero para acceder a la información se utilizó Bluetooth o ConnectPort X4. En la tabla IV, se detalla el valor monetario de cada uno de los componentes a utilizados que se usaron en el prototipo:

Tabla IV: Costos de los materiales utilizados.

MATERIAL	CANTIDAD	VALOR UNITARIO (\$)	VALOR (\$)
Arduino UNO	4	28,49	113,96
XBee DigiMesh	4	21,00	84,00
Placa para XBee	4	24,95	99,80
ConnectPort X4	1	499,00	499,00
Bluetooth Shield v1.2	2	17,66	35,32
DS18B20	4	2,99	11,96
Batería	4	9,50	38,00

Cuando se utiliza Bluetooth, la red implementada tuvo un costo de \$382,71 y con ConnectPort X4, \$846,39. En el proyecto, algunos de los equipos fueron proporcionados por el Centro de Visión y Robótica.

CAPÍTULO 5

FUNCIONAMIENTO Y PRUEBAS

En este capítulo, se desarrolló la metodología que se utilizó para la adquisición de datos con el propósito de analizar los diferentes parámetros, la calidad de servicio y el consumo de energía, en cada uno de los ambientes en los que se sometieron. Las pruebas se realizaron en tres entornos, cada una se describirá con su respectivo justificativo.

Para el entorno terrestre, las pruebas se llevaron a cabo a lado de las canchas de la FIEC-ESPOL porque es un lugar abierto y plano, como se muestra en la Figura 5.1. Estas pruebas tuvieron la finalidad de verificar si los módulos podían transmitir hasta 100m en escenario exterior como se detalla en la hoja de especificaciones [30] y determinar bajo qué condiciones es posible.



Figura 5.1 Canchas de la FIEC-ESPOL [31].

Para los entornos acuáticos, se desarrollaron en dos escenarios: en interior y exterior, localizados en los Laboratorios y en la Estación Experimental del CENAIM respectivamente. En ambiente cerrado se encontraron tanques, recipientes negros ovalados de aproximadamente 4m de ancho y 6m de largo y 1m de altura, como se observa en la Figura 5.2.



Figura 5.2 Tanques en las Instalaciones del CENAIM.

Para apreciar más detalles de este escenario ver Anexo F; solo se pudo hacer conexiones punto a punto debido a que el lugar es pequeño y también, se comprobó que los módulos pueden transmitir hasta 30m.

En la Figura 5.3, se ilustra el escenario exterior estuvo conformado por piscinas de tierra de diferentes áreas (500, 1000, 2500m²). Para el cultivo de camarones, las piscinas eran pequeñas y de 30cm de profundidad (Ver Anexo G), se interconectaron en fila de punto a punto, es decir, un nodo en cada estanque. En cambio, para el policultivo se utilizan piscinas grandes y de 1m de profundidad, donde se empleó la red tipo malla para la comunicación inalámbrica, basada en los datos obtenidos (alcance máximo, altura de los módulos, entre otras) de la topología punto a punto en el mismo lugar.



Figura 5.3 Estanques en la Estación Experimental del CENAIM-ESPOL.

El sistema electrónico requirió: Primero, estar cubierto con una caja térmica para proteger especialmente del agua, la salinidad y la humedad, y por último, permanecer flotando en el agua. Por consiguiente, se utilizó espuma polietileno cubierta con fibra de vidrio para que sea resistente a golpes, como se ilustra en el Anexo E.

Para este experimento, se fijó la tasa de datos en el puerto serial a un valor de 9600bps y en RF a 250Kbps. Las pruebas se repitieron 100 veces en cada escenario para tener un margen de error aceptable, ya que el número mínimo de muestras requeridas eran 73 a un 95% de confiabilidad basado en la fórmula estadística del tamaño de muestreo para un intervalo de confianza conocido [32], para mayor información ver Anexo I.

La comunicación se realizó entre dos nodos principales (Transmisor y Receptor), en el Anexo J se puede observar el diagrama de flujo de cada uno de ellos, y hubieron dos repetidores para darle forma a la red y más alcance. Los nodos principales se encargaron de obtener los valores de los sensores, el número de errores en las tramas y el retardo en establecer el enlace. Los repetidores en algunos casos capturaban el valor del sensor y con la ayuda de un módulo Bluetooth se escuchaba el tráfico entre los nodos (verificar y adquirir los datos). Todos los nodos tenían un XBee DigiMesh. Para estas

transmisiones inalámbricas se consideró: Línea de vista, Radio de Fresnel, y Curvatura de la tierra.

5.1 PRUEBAS DE CONSUMO DE ENERGIA

El manejo de las pruebas de consumo energético instantáneo, se realizó con la medición simultánea de dos parámetros específicos del circuito que son: el voltaje conectado en paralelo y la corriente en serie, para los diferentes modos de trabajo.

Los módulos XBee DigiMesh tienen tres modos: transmisión, recepción/espera y ahorro. En cada uno de ellos se observó un comportamiento diferente en potencia y en el tiempo en el que esta cada modo. En la Tabla V, se muestra los valores promedios obtenidos en cada modo.

Tabla V: Consumo energético instantáneo de los módulos.

XBee	Energía		
Modo	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)
Tx	3,10	46,10	142,91
Rx / Espera	3,10	51,00	158,10
Ahorro	3,10	0,04	0,12

5.2 PRUEBAS DE RETARDO

Para obtener el retardo, se programó un saludo entre los módulos de transmisión y se midió el tiempo de duración desde envío hasta recepción del nodo de partida (transmisor). Tal y como se observa en la Figura 5.4, el diagrama de flujo del saludo, consistió en que el transmisor le enviaba un mensaje (comando) para iniciar la comunicación al receptor con un sello de tiempo. Si el receptor recibía el mensaje prefijado entonces él enviaba una confirmación.

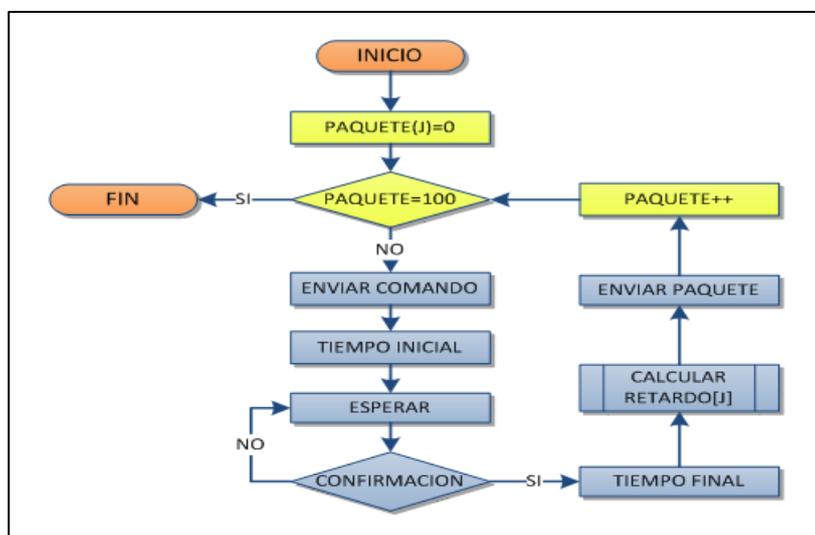


Figura 5.4 Diagrama de flujo del saludo del transmisor.

El tiempo transcurrido en establecer el saludo era el doble del tiempo del enlace entre los nodos debido a que recorre dos veces el mismo camino, por consiguiente, el valor obtenido se dividió para 2.

Primero, se realizaron las pruebas en tierra hasta alcanzar los 100m, protegiendo el radio de Fresnel; el tiempo promedio de todas las pruebas en establecer el enlace fue de 22,99ms con una desviación estándar 3,18.

Luego de la experimentación en medios terrestres, se procedió en acuáticos. En la Tabla VI, se muestra un resumen de los resultados obtenidos en tanques, escenario acuático en interiores, y piscinas, en exteriores.

TABLA VI: Tiempo del enlace entre el Tx y Rx.

Lugar	Distancias (m)	Retardos promedios (ms)	
		Promedio	Desviación Estándar
Tanques	20,00	25,45	6,46
	27,30	38,71	10,26
Piscinas	20,30	16,50	3,74
	40,60	17,60	4,23
	60,90	16,40	3,65

5.3 PRUEBAS DE PÉRDIDA DE PAQUETES

Para la pérdida de paquetes, se realizó un algoritmo de envío de datos, 32 bytes equivalentes a la mitad del buffer máximo que soporta el microcontrolador y la octava parte que maneja el XBee DigiMesh.

En la Figura 5.5, se observa el diagrama de flujo de una parte del código del nodo receptor para ejecutar el cálculo del error el número de veces antes mencionado. Cada vez que le llega un paquete hacia la comparación respectiva, por lo que se obtenían 100 datos en cada prueba.

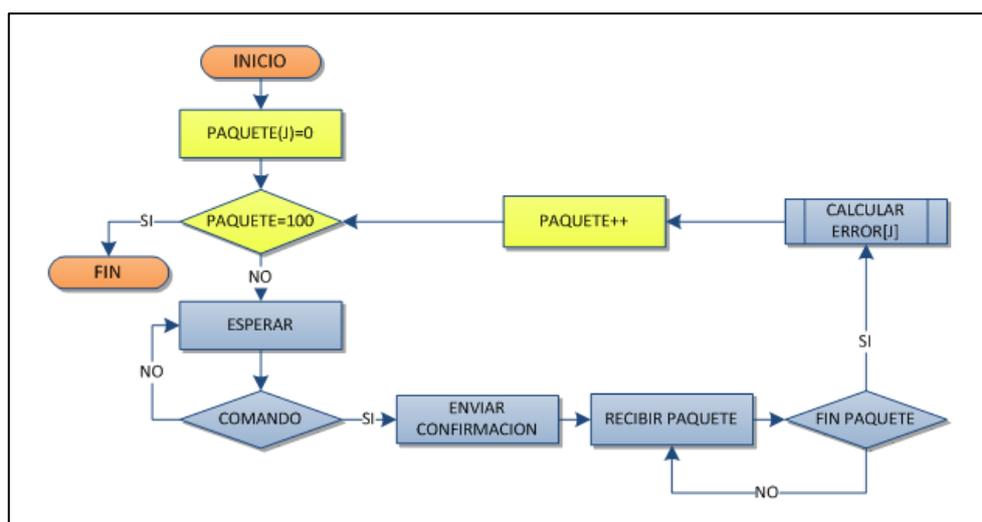


Figura 5.5 Diagrama de flujo del saludo del receptor.

El nodo transmisor enviaba todos los datos (32KB) y esperaba a que el nodo receptor comparara y procesara lo que recibió para enviar la siguiente trama. Esta secuencia se la realizó 100 veces en cada escenario para tener un margen de error, ya que el número de muestras mínimas requeridas era de 73 a un 95% de confiabilidad.

Luego, con las condiciones obtenidas para una buena calidad de la comunicación con mínima pérdida de paquetes en una red punto a punto, la prueba consistió: Primeramente, armar una red tipo malla en dos esquemas diferentes; formar la red con cuatro nodos en una piscina y con cinco, en dos; tal y como se observa en el Anexo H; segundo, proteger la línea de vista y por lo menos, el 60% del primer radio de Fresnel entre el nodo que captura el dato y el receptor, y finalmente, enviar la temperatura obtenida por cada sensor del nodo al acumulador (receptor), que almacena la información, cada cierto período de tiempo dependiendo de la frecuencia de monitoreo que se programe, en este caso cada media hora.

CAPÍTULO 6

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo, se analizó los resultados obtenidos de consumo de energía, tiempo en establecer el enlace y pérdida de paquetes en cada uno de los escenarios, los cuales fueron mostrados en el capítulo anterior. Adicional, se determinaron las limitaciones entre módulos necesarios para cubrir las áreas deseadas (piscinas grandes). Finalmente, se estudió si la red es viable tanto en características como en infraestructura para automatizar los procesos en medios acuáticos.

6.1 CONSUMO ENERGÉTICO

Los valores finales de los resultados se los extrapolo según la frecuencia de operación de los dispositivos, es decir, diferentes tiempos en ahorro de energía, transmisión o recepción.

El modo ahorro de energía que posee el XBee DigiMesh tiene un gran impacto para la construcción de la red. Para el consumo de energía según la frecuencia de monitoreo diaria (f), número de veces que se capturan los datos al día, realizamos las siguientes asunciones: Primero, un monitoreo equivale a transmitir durante un minuto; segundo, la comunicación es half dúplex (envía o recibe datos); tercero, el tiempo de recepción más el tiempo de espera equivale al doble del tiempo de transmisión y por último, el tiempo de ahorro es lo que reste del día (configurar SM del módulo transceptor).

$$P = f * (t_{Tx} * P_{Tx} + t_{Rx} * P_{Rx}) + t_A * P_A \quad (6.1)$$

$$t_{Tx} = 2 * t_{Rx} [h] \quad (6.2)$$

$$t_A = 24 - t_{Tx} - t_{Rx} = 24 - 3t_{Tx} [h] \quad (6.3)$$

$$P = f * [t_{Tx} * (P_{Tx} + 2 * P_{Rx} - 3 * P_A)] + 24 * P_A \left[\frac{mWh}{día} \right] \quad (6.4)$$

Con la Ecuación 6.4, se calcula la potencia consumida (P) en Watt utilizando la duración de cada modo de operación en día (t). Se define en la Ecuación 6.5-6.6, los tiempos de operación de los módulos XBee DigiMesh.

Se reemplazó la Ecuación 6.7 con los valores de potencia obtenidos (Tabla V) y obtuvimos la Ecuación 6.8, donde el consumo de potencia depende de la frecuencia de monitoreo:

$$P \left[\frac{mWh}{dias} \right] \cong 7,65 * f + 2,88 \quad (6.8)$$

Finalmente, el tiempo de duración de la batería depende de las características de la misma y la frecuencia de monitoreo. Para ilustrarnos, en la Figura 6.1 vemos la variación por baterías de diferente voltaje y amperaje.

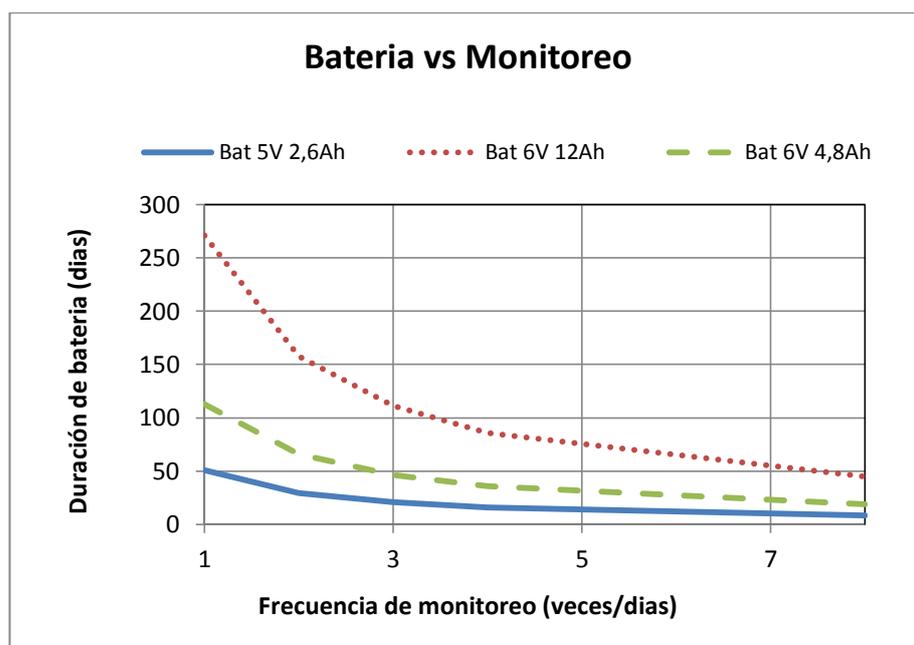


Figura 6.1 Duración de la batería vs frecuencia de monitoreo.

6.2 CONFIABILIDAD DE LOS DATOS

En esta sección, se analizaron dos factores importantes de una comunicación inalámbrica: tiempo en establecer el enlace y pérdida de paquetes, cuyos resultados obtenidos en la experimentación se muestran en el Anexo [K-L]. El objetivo de toda transmisión, es tener mínimos errores y que la comunicación tienda a ser instantánea.

De acuerdo a las pruebas realizadas, punto a punto entre los módulos de transmisión en los diferentes entornos, se obtuvieron retardos promedios con su respectiva dispersión, como se observa en la Tabla VI.

Al experimentar la transmisión en el medio acuático, los valores obtenidos del retardo fueron coherentes con los teóricos. Adicional, podemos emplear la Ecuación 8, adquirida de la hoja de especificaciones de los módulos utilizados [33], para determinar el tiempo máximo en que llega un mensaje al realizar 32 saltos entre nodos.

$$\text{BroadcastTxTime} = NN \times NH \times (MT + 1) \times 18ms \quad (8)$$

El parámetro NN son “ranuras de tiempo de la red”, espera antes de retransmitir la información, por defecto es 3. MT, es el número de veces en que se retransmite el mensaje para dar mayor seguridad, por defecto es 3. Finalmente, NH es el número de saltos que puede realizar el mensaje antes de ser descartado, el valor máximo es 32. Al reemplazar estos valores, el tiempo en que se demora en hacer 32 saltos es de 6,9s.

Se estudiaron los números de errores que ocurrieron en la radiocomunicación. En la Figura 6.2, se muestran los resultados obtenidos en medios acuáticos, escenario exterior, a una distancia (d) de 28,6m entre nodos e ignorando el radio de Fresnel. Al aumentar la altura de los módulos, disminuía el número de errores porque la obstrucción del radio era menor.

Esto ocurrió porque el escenario exterior fue un conjunto de piscinas camaroneras y el agua no cubría el borde de la misma. Por esa razón, hubo que considerar la altura del obstáculo (h_o), ubicado en la mitad del enlace, debido a que afectaba al radio de Fresnel, como se ilustra en la Figura 6.3. Por lo tanto, la altura teórica requerida para la antena (h_a) debía ser mayor de 1,27 m. En cambio, para alturas de 0,30 m y

0,90 m, se obtuvieron errores por lo que se decidió colocar una antena de 1,50 m y como resultado, no hubo pérdidas de paquetes.

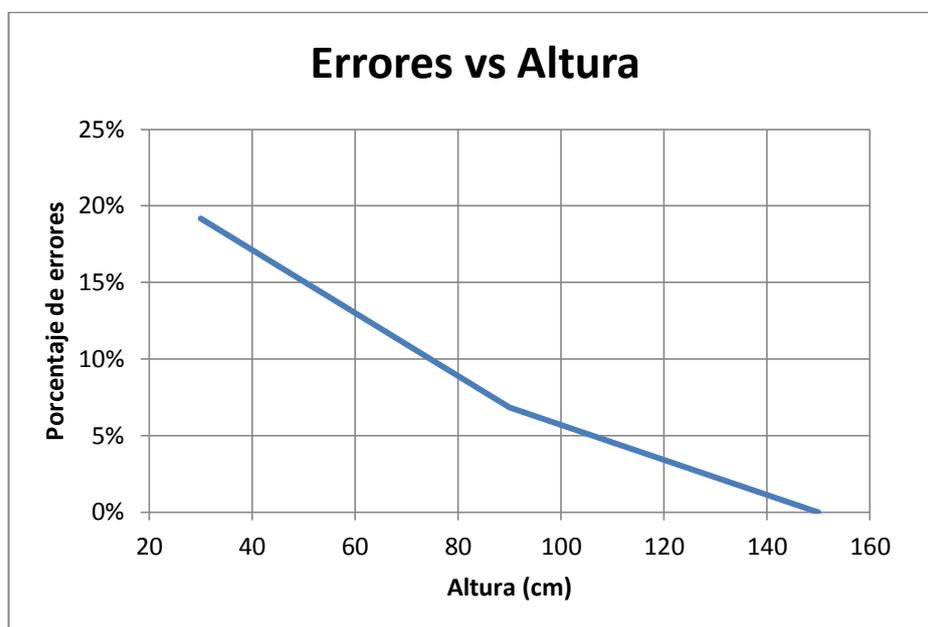


Figura 6.2 Porcentaje de errores vs altura de los módulos.

En cambio, cuando se consideró el radio de Fresnel en las pruebas, los resultados fueron prometedores. En los diferentes entornos se obtuvieron 0 errores en todas las mediciones dentro del número de muestras estadísticas. Por consiguiente, es importante recalcar que al no considerar el radio de Fresnel (R) en la transmisión sin importar el entorno se obtienen pérdidas de paquetes.

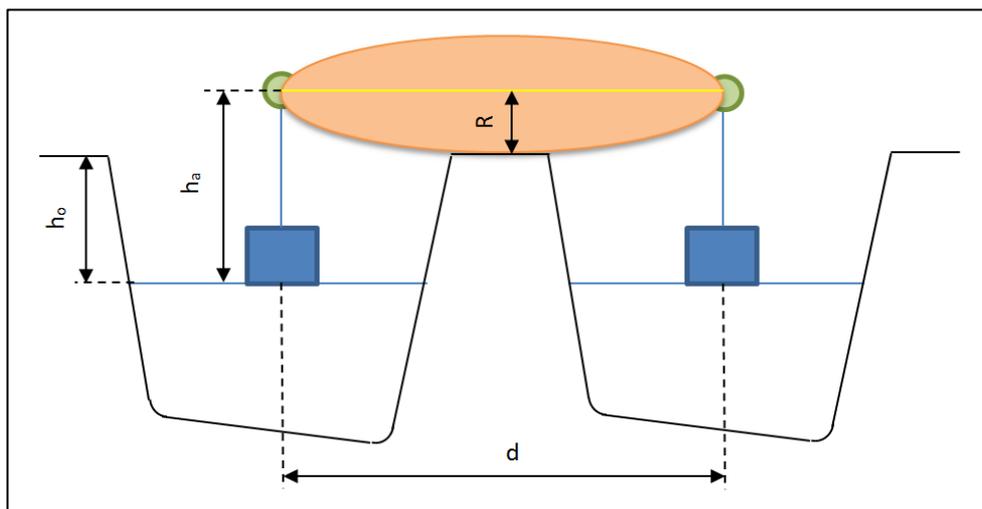


Figura 6.3 Esquema de la zona de Fresnel entre dos nodos.

En la hoja de especificaciones de los módulos XBee DigiMesh, está establecido que alcanzan una distancia máxima de 100,00 m pero en este estudio, se alcanzó hasta 60,90 m debido a que la altura requerida para los módulos es directamente proporcional a la separación entre nodos. Para alcanzar los 100m en dicho escenario, se necesitaba 2,40 m de altura, causando inestabilidad física en el sistema.

Luego, se implementó una red tipo malla en una piscina bajo las condiciones obtenidas, donde cada nodo enviaba la información capturada por el sensor al acumulador (nodo 1) y no habían obstáculos ya que los nodos estaban en la misma piscina. En la Figura

6.4, se muestra los resultados de la radiocomunicación entre los nodos de la red tipo malla, donde cada uno enviaba la temperatura cada media hora duramente un lapso de tiempo. Como se refleja en el gráfico, los datos llegaron al receptor sin ningún inconveniente y hay coherencia entre ellos.

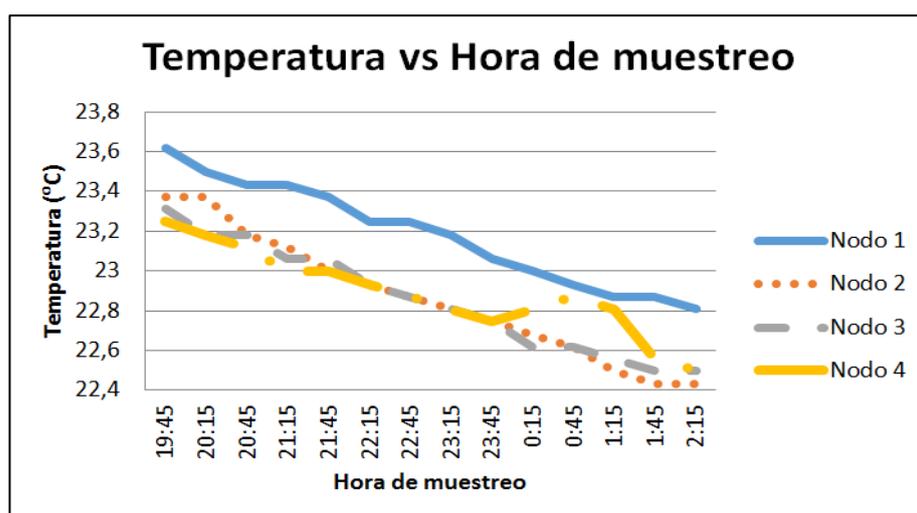


Figura 6.4 Temperaturas obtenidas de la red en una piscina.

La segunda red tipo malla que se implementó fue en dos piscinas, cuatro nodos capturaban la temperatura y uno actuaba como repetidor para que traspase la información de una piscina a otra. En la Figura 6.5, se ilustra los resultados obtenidos utilizando dos piscinas; los nodos que se encuentra en la misma piscina, tienden a ir de forma paralela.

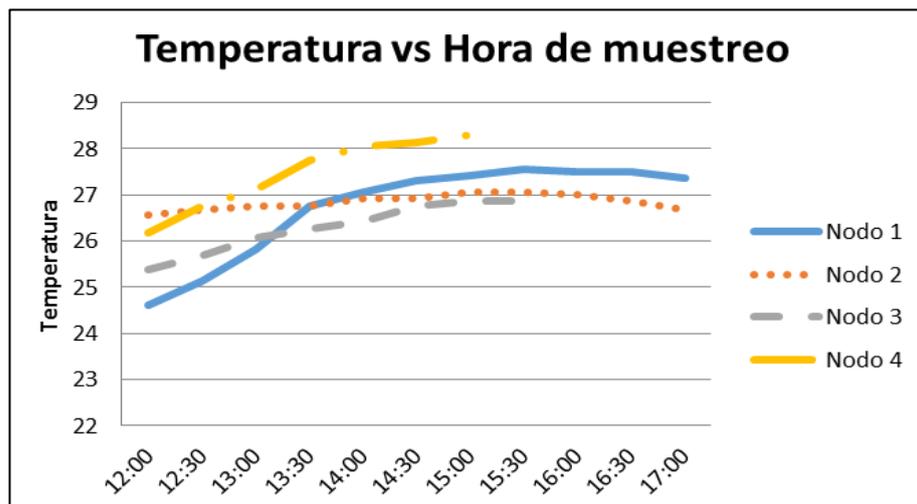


Figura 6.4 Temperaturas obtenidas de la red en dos piscinas.

El acumulador receptaba la información de los demás nodos y si uno de ellos no enviaba a determinada hora, la recepción no se veía afectada.

6.3 VIABILIDAD TÉCNICA DE PROCESOS AUTOMATIZADOS

Considerando los resultados obtenidos previamente se determinó la viabilidad de implementar la red propuesta, estudiando aspectos importantes: técnico, económico y operativo.

Los nodos de la red estuvieron compuestos por: Módulo de comunicación inalámbrica XBee DigiMesh 2.4, Placa Arduino con

microcontrolador ATmega 328, Sensor de temperatura digital DS18B20 y Batería recargable.

Esta combinación facilita la oportunidad de agregar periféricos de monitoreo tales como sensores de oxígeno disuelto, barómetro, hidrófono, turbidez, entre otros; o control, tales como, motores, relés, alarmas, indicadores, etc. Cada nodo se dotara según la necesidad y producción del área que cubrirá.

La selección de los módulos XBee DigiMesh 2.4 se basó en las siguientes ventajas: No requieren jerarquía en su configuración, bajo consumo de energía (150mW máx.) y menor dimensión física (27,61x24,38mm).

En el aspecto económico como se puede observar en la Tabla IV, los costos de cada uno de los componentes son accesibles. Un nodo básico, constituido por un XBee DigiMesh, un Arduino, un sensor de temperatura y una batería de 12V 1.3Ah, no supera los \$65. Al emplear un Connect Port X4 representa una centralización de los datos y una conexión con el exterior mediante el estándar 802.11 (Wi-Fi) o 802.3 (Ethernet). Adicionalmente, incorpora un servidor web con

el lenguaje Python, donde se puede visualizar los comportamientos de los nodos en una página web.

En la Figura 6.1, se muestra que a mayor frecuencia de monitoreo, mayor confiabilidad de datos en el tiempo por ende hay una mayor demanda de energía en la red.

Al formar la red con topología malla, se consideró entre cada nodo, las condiciones físicas obtenidas en la experimentación y el análisis punto a punto realizado previamente para obtener una buena comunicación, como se observa en el Anexo H. En los procesos automatizados, se evita la pérdida de datos ya que existen diferentes rutas para llegar de un nodo a otro.

CONCLUSIONES

1. Tal y como se puede apreciar en el capítulo 4, se implementó una red inalámbrica con módulos XBee DigiMesh. Se comprobó que estos módulos no poseen jerarquía a través de lo expuesto en la Tabla I y son de bajo consumo de energía como se observa en la Tabla V, tiene un modo de ahorro (0,12mW).
2. De acuerdo a lo expuesto en la Tabla VI, el retardo promedio no se vio afectado en medios acuáticos al compararlo con las pruebas realizadas en tierra. Pero, cabe recalcar que en escenario en interiores, el tiempo en establecer la conexión entre módulos Xbee DigiMesh es mayor que en escenarios outdoor debido a que en un ambiente cerrado hay más obstáculos y se produce el efecto multitrayectoria.

3. La comunicación inalámbrica punto a punto entre módulos XBee DigiMesh se puede realizar hasta los 100 metros en medios acuáticos, pero requiere que la altura de los módulos sea elevada con respecto al nivel del agua. Como se detalla en el capítulo 3, se debe considerar en el diseño del enlace: la línea de vista y el primer radio de Fresnel, para que haya una buena comunicación.

4. De acuerdo a lo expuesto en el capítulo 5-6, las pruebas finales consistieron en armar la red tipo malla en dos esquemas: 4 nodos en una piscina y 5 nodos en dos piscinas pero uno, actuaba como repetidor. Como resultado, el monitoreo de la temperatura en entornos acuáticos fue prometedor porque cada nodo enviaba la temperatura obtenida por el sensor cada cierto período de tiempo (en este caso, cada 30 minutos) con mínimos errores, debido a que se emplearon las condiciones obtenidas en experimentos previos de la red punto a punto.

RECOMENDACIONES

1. Antes de comenzar las pruebas de los nodos, se debe configurar el modo ahorrador en el XBee para que así la batería dure significativamente por más tiempo.
2. Considerar el tiempo de adquisición y procesamiento de los datos, ya que tenemos al buffer del XBee y del Arduino como limitantes.
3. Al interconectar más de tres módulos XBee DigiMesh dentro de un espacio cerrado para realizar pruebas, asegurarse que no estén en configuración broadcast, los mensajes pueden repetirse.
4. Si se requiere que el enrutamiento de la red sea estático, se debe utilizar en la implementación una puerta de enlace (Connect Port X4) ya que es un medio para centralizar los datos.

5. Un trabajo futuro puede ser un sistema autónomo de distribución de alimentos para los cultivos acuícolas con monitoreo periódico o permanente, y dimensionar baterías recargables según la operación de cada nodo o al trabajar en lugares abiertos se da paso a emplear celdas solares para la acumulación de energía.

ANEXOS

ANEXO A

DISEÑO ELECTRÓNICO DE LOS NODOS DE RADIOCOMUNICACIÓN.

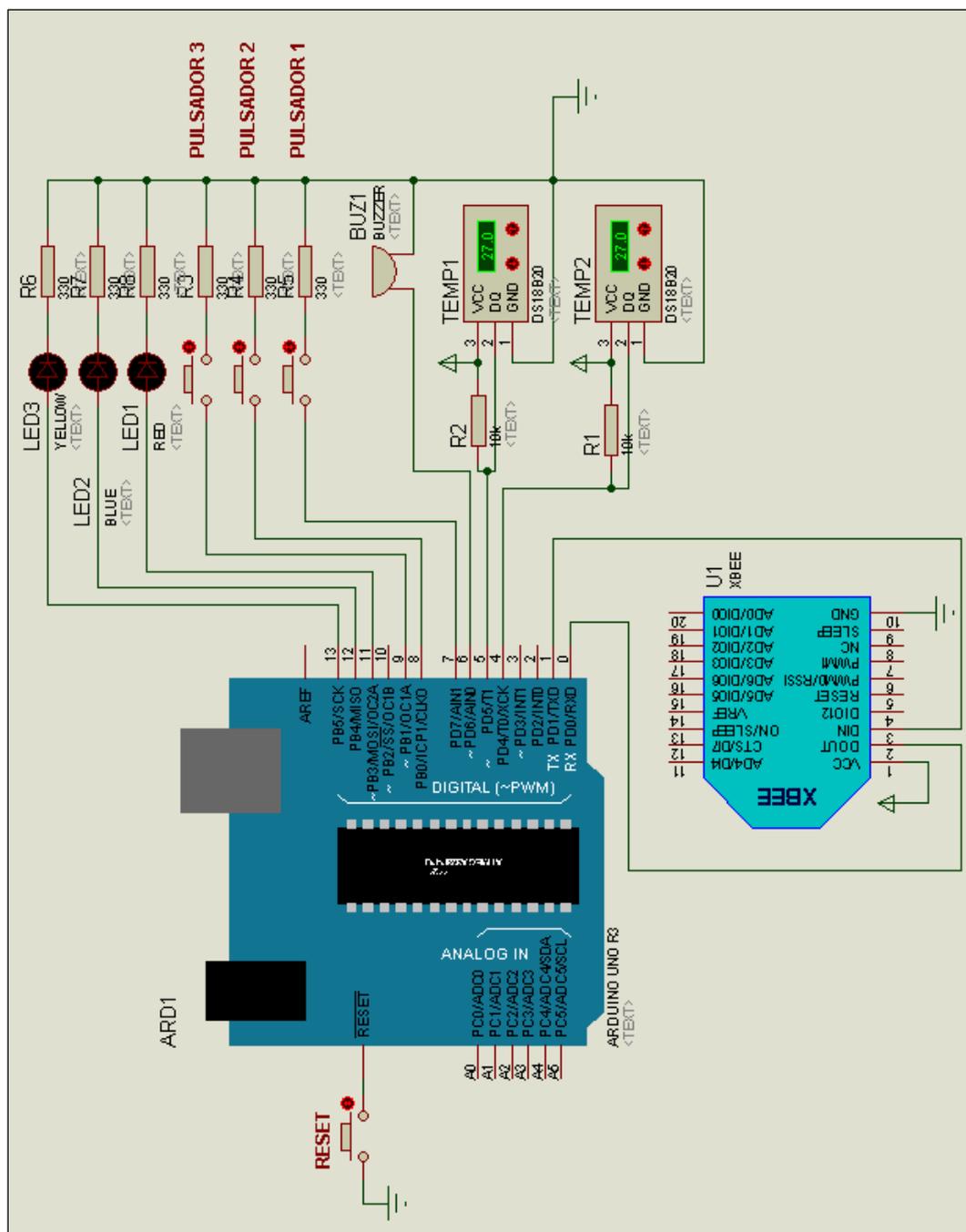


Figura A.1 Diseño electrónico del transmisor.

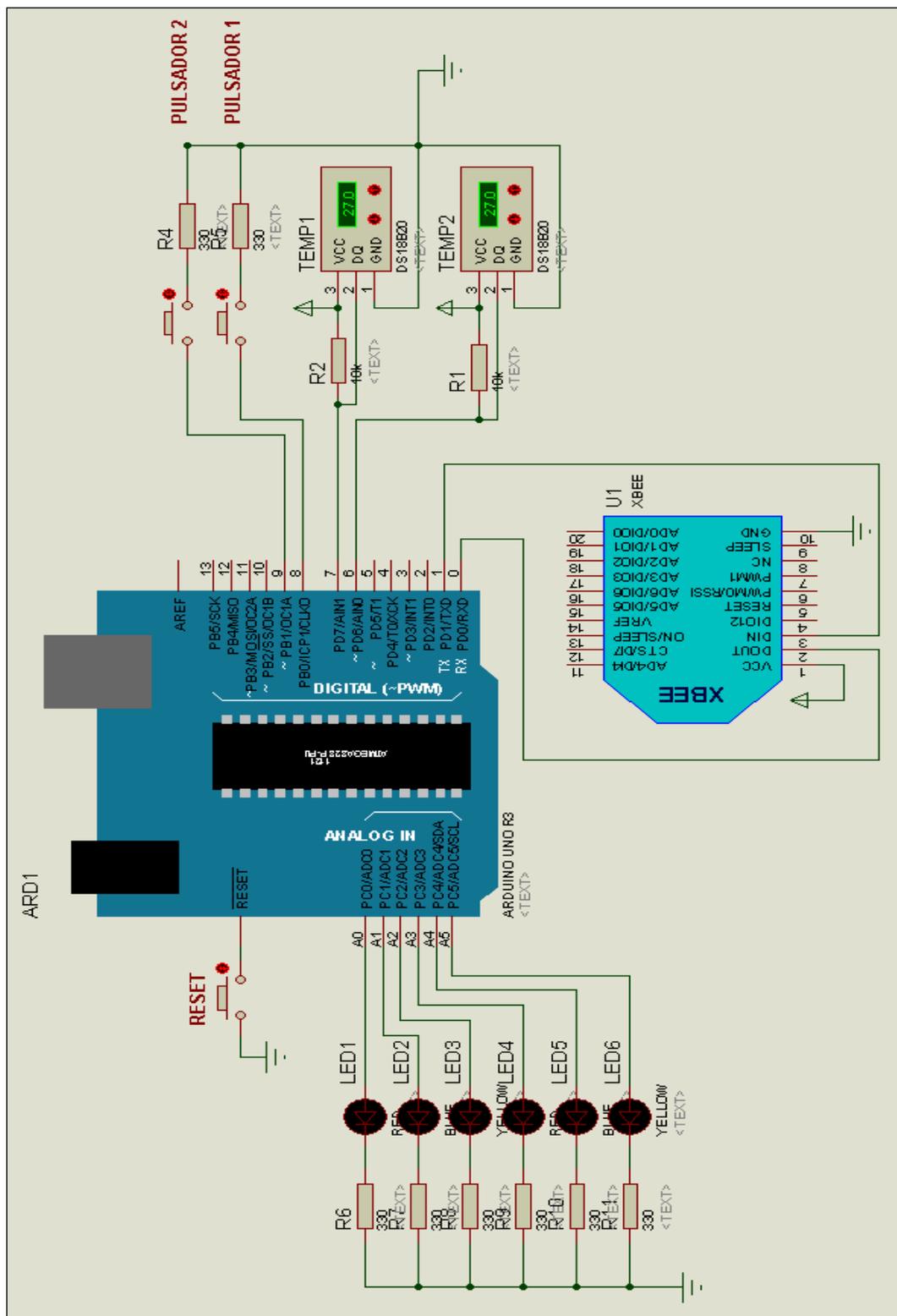


Figura A.2 Diseño electrónico del receptor.

ANEXO B

DIAGRAMA DE BLOQUE DE LOS NODOS DE RADIOCOMUNICACIÓN

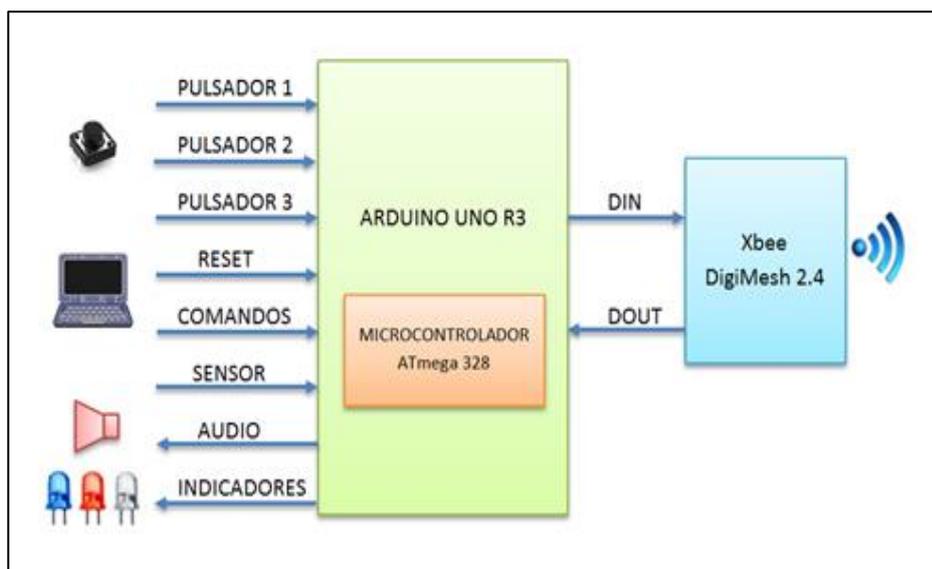


Figura B.1 Diagrama de bloques del transmisor.

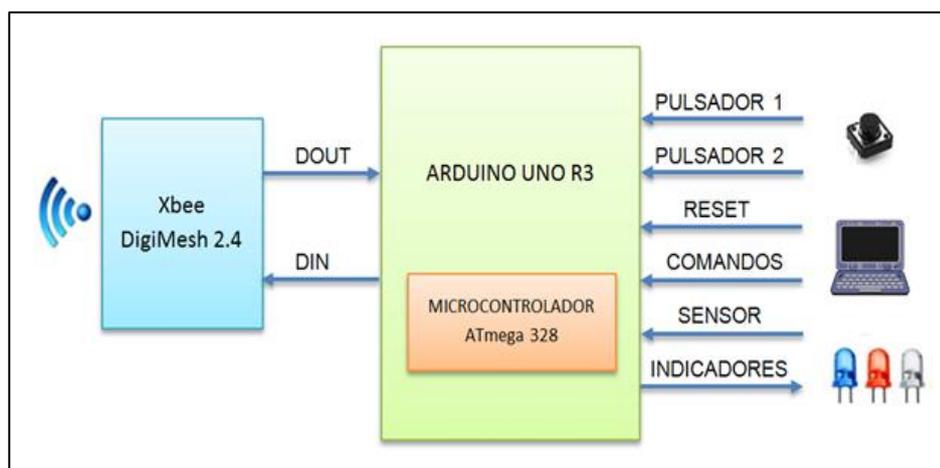


Figura B.2 Diagrama de bloques del receptor.

ANEXO C

INFORMACIÓN DETALLADA DEL RECEPTOR

Las entradas y salidas del nodo receptor, que se muestran en el diagrama de bloque de la Figura B.1, las cuales fueron procesadas por el Arduino Uno R3; tiene una función específica:

PULSADOR 1.- Mostrar la información de los sensores.

PULSADOR 2.- Mostrar los errores de la transmisión.

COMANDOS.- Enviar una instrucción por medio del puerto serial del XBee.

- Y Esperar un paquete de datos.
- X Esperar 100 paquetes de datos.
- W Acción del PULSADOR 1.
- V Enviar un mensaje de confirmación '8'.
- U Acción del PULSADOR 2.
- T Mostrar el número de errores del primer paquete de datos.
- S Mostrar el número de errores de los 100 paquetes de datos.

ANEXO D

INFORMACIÓN DETALLADA DEL TRANSMISOR

Las entradas y salidas del nodo transmisor, que se muestran en el diagrama de bloque de la Figura B.2, las cuales fueron procesadas por el Arduino Uno R3; tiene una función específica:

PULSADOR 1.- Enviar un paquete de datos.

PULSADOR 2.- Enviar 100 paquetes de datos.

PULSADOR 3.- Enviar los retardos creado al establecer la conexión.

RESET.- Reiniciar el microcontrolador.

COMANDOS.- Enviar una instrucción por medio del puerto serial del XBee.

A Mostrar la información de los sensores.

B Acción del PULSADOR 1.

C Acción del PULSADOR 2.

D Acción del PULSADOR 3.

SENSOR.- Permite capturar los datos de un parámetro a investigar.

AUDIO.- Sonido que se activa al terminar una opción.

INDICADORES.- Indica el estado del paquete, es decir, si el paquete se envía y cuando se termina de enviar.

ANEXO E

FLOTADOR ARTESANAL
(FIBRA DE VIDRIO Y ESPUMA DE POLIETILENO).



Figura E.1 Vista Superior del flotador.



Figura E.2 Vista Lateral del flotador.

ANEXO F

ESQUEMA DEL ENTORNO ACUÁTICO EN INTERIOR

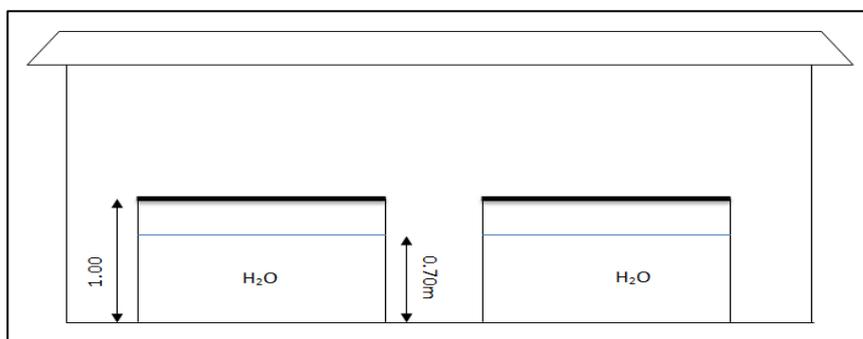


Figura F.1 Vista Frontal del entorno acuático en interiores.

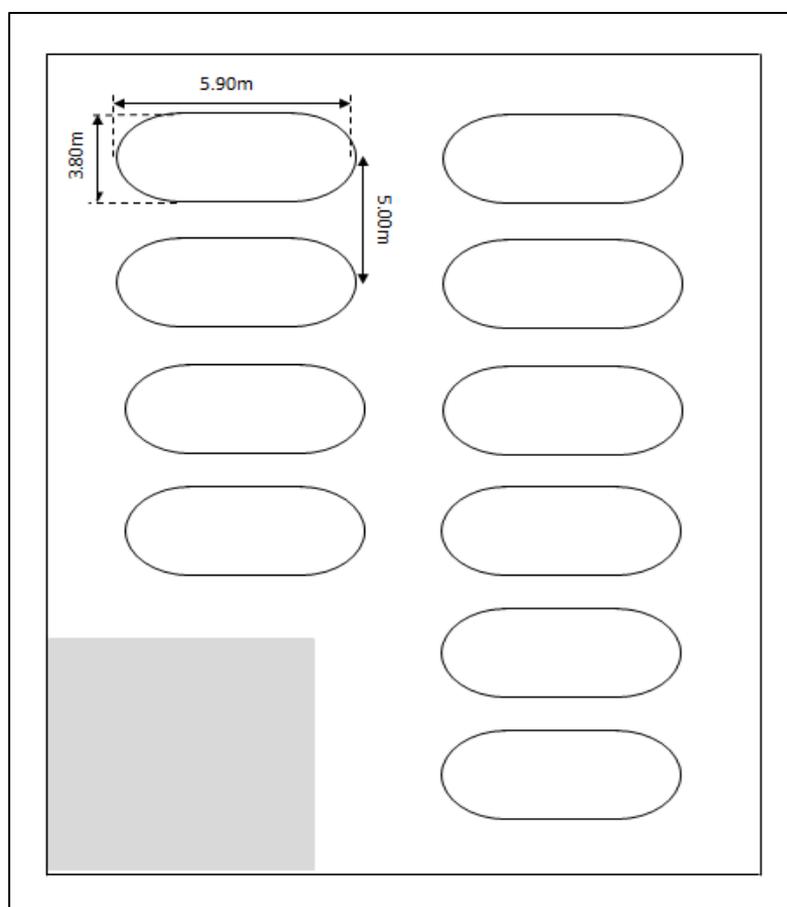


Figura F.2 Vista Superior del entorno acuático en interiores.

ANEXO G

ESQUEMA DEL ENTORNO ACUÁTICO EXTERIOR

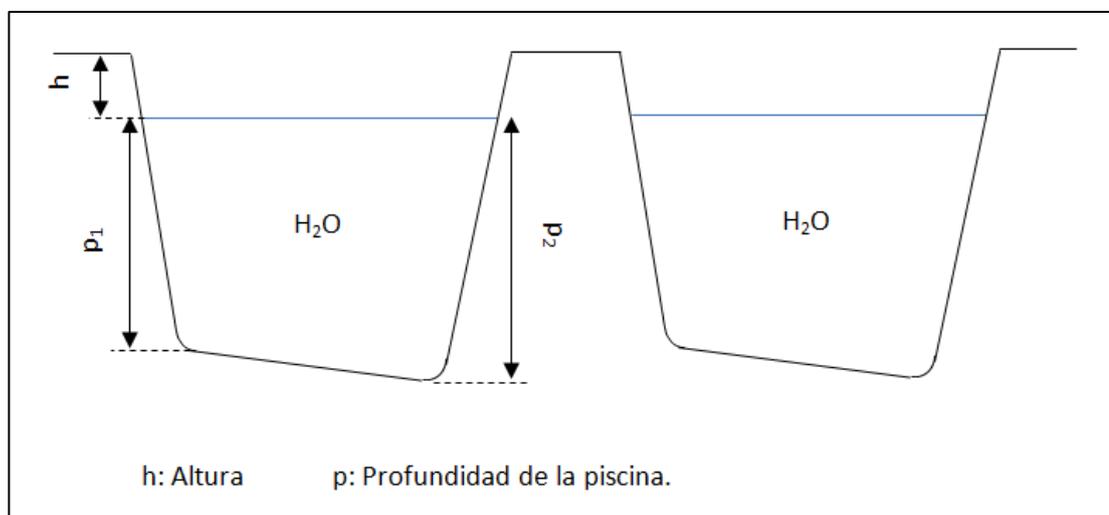


Figura G.1 Vista Lateral del entorno acuático exterior.

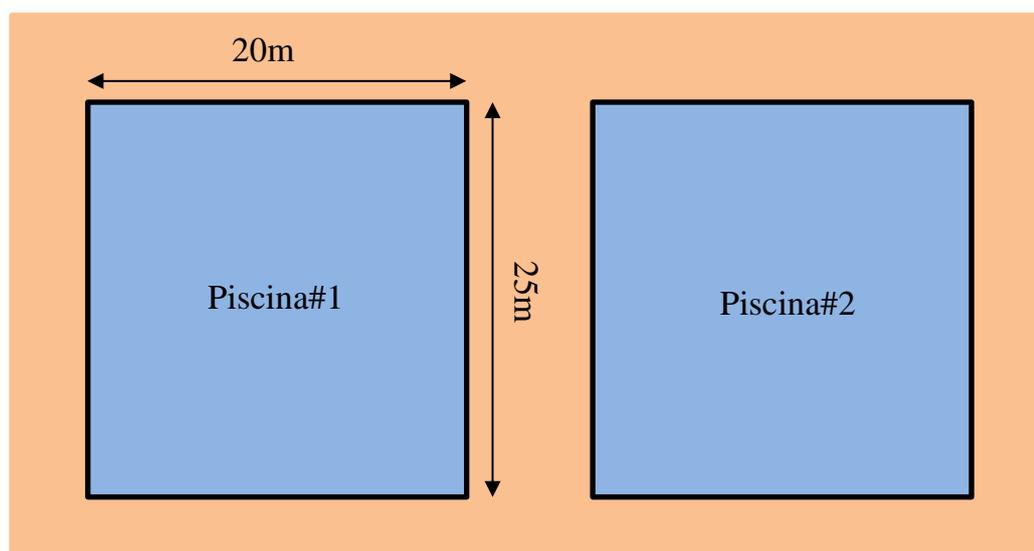


Figura G.2 Vista Superior del entorno acuático exterior.

ANEXO H

ESQUEMA DE LA RED CON TOPOLOGÍA MALLA

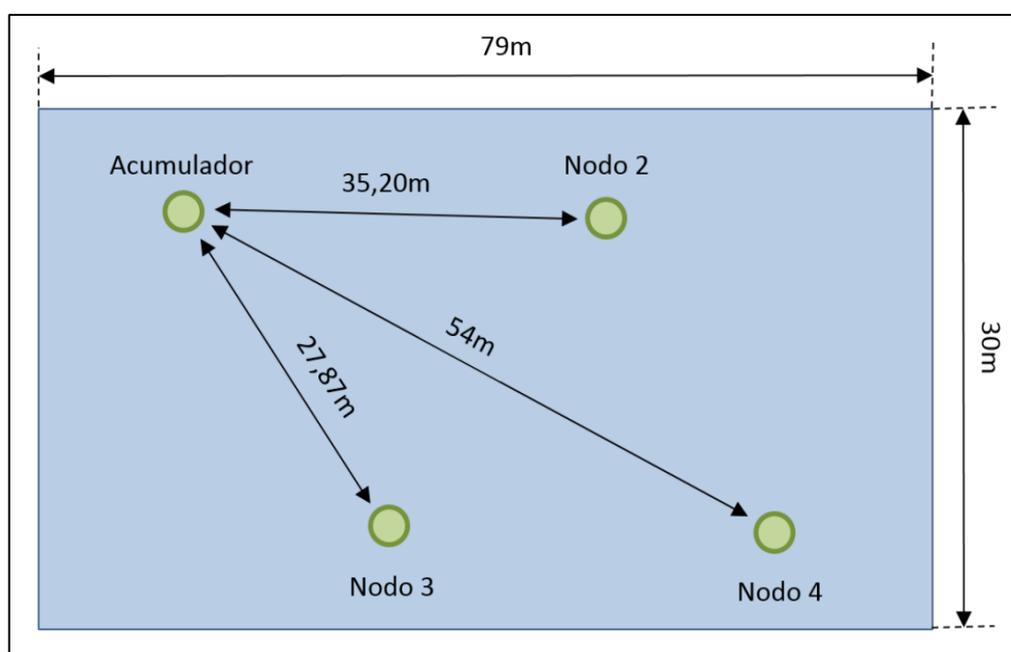


Figura H.1 Esquema de la red tipo malla en una piscina grande.



Figura H.2 Fotografía de la red tipo malla en una piscina.

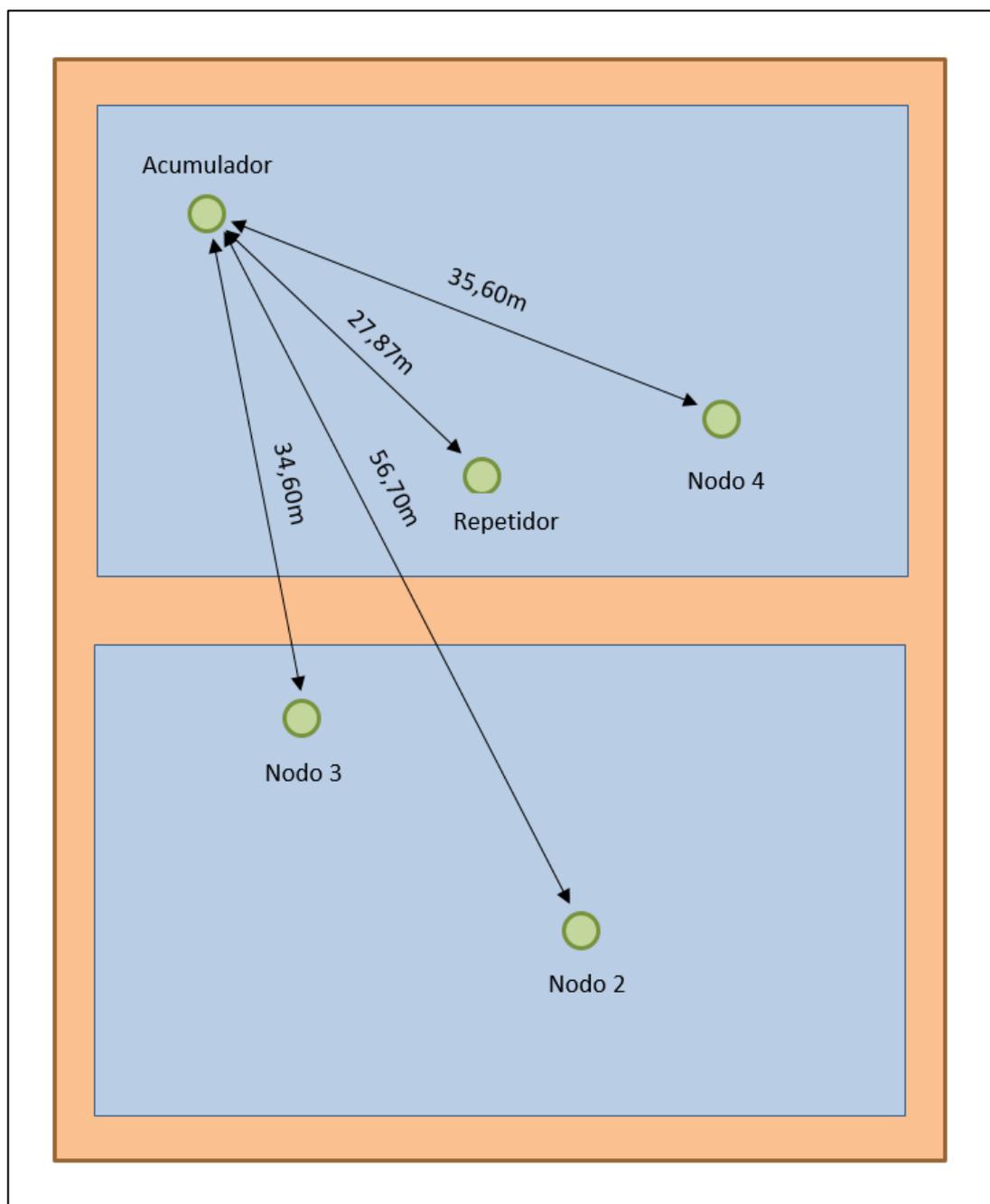


Figura H.3 Esquema de la red tipo malla en dos piscinas grandes.

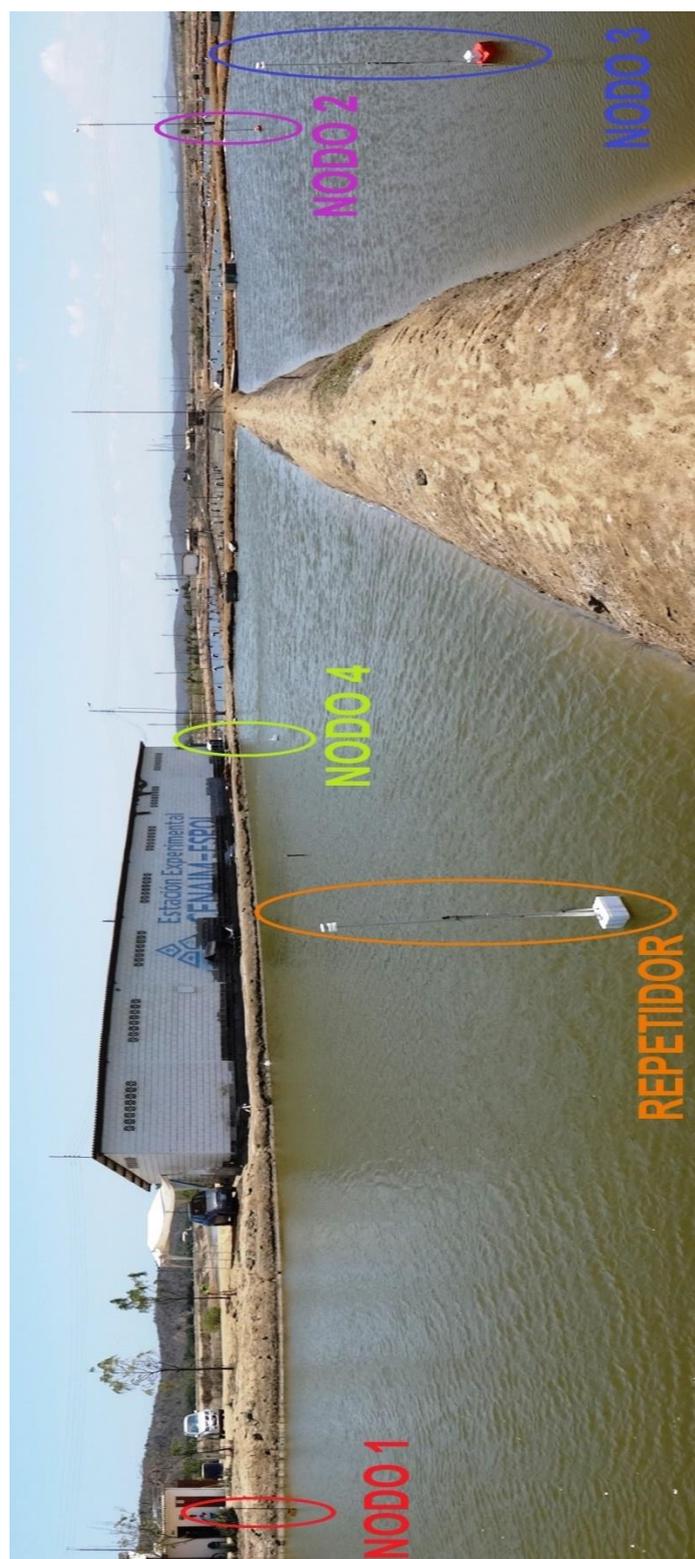


Figura H.4 Fotografía de la red tipo malla en dos piscinas.

ANEXO I

TAMAÑO DE MUESTREO.

Para calcular el número mínimo de muestras óptimas a cada distancia del enlace en topología punto a punto, se utilizó la siguiente fórmula:

$$n = \frac{Z_{\alpha}^2 * p * q}{D^2}$$

Donde:

$$\alpha \text{ (Confianza)} = 95\%$$

$$Z_{\alpha} = 1.96$$

$$p \text{ (Probabilidad de éxito)} = 95\%$$

$$q \text{ (Probabilidad de fallo)} = 5\%$$

$$D \text{ (error mínimo)} = 0.05$$

Luego de reemplazar los valores respectivos en la fórmula:

$$n = \frac{(1,96) * (0,95) * (0,05)}{(0,05)^2} = 73$$

OBSERVACIÓN: Se tomarán 100 muestras para cada distancia, con la finalidad de eliminar los datos aberrantes u obtener un error mínimo.

ANEXO J

DIAGRAMA DE FLUJO DE LOS NODOS DE RADIOCOMUNICACIÓN.

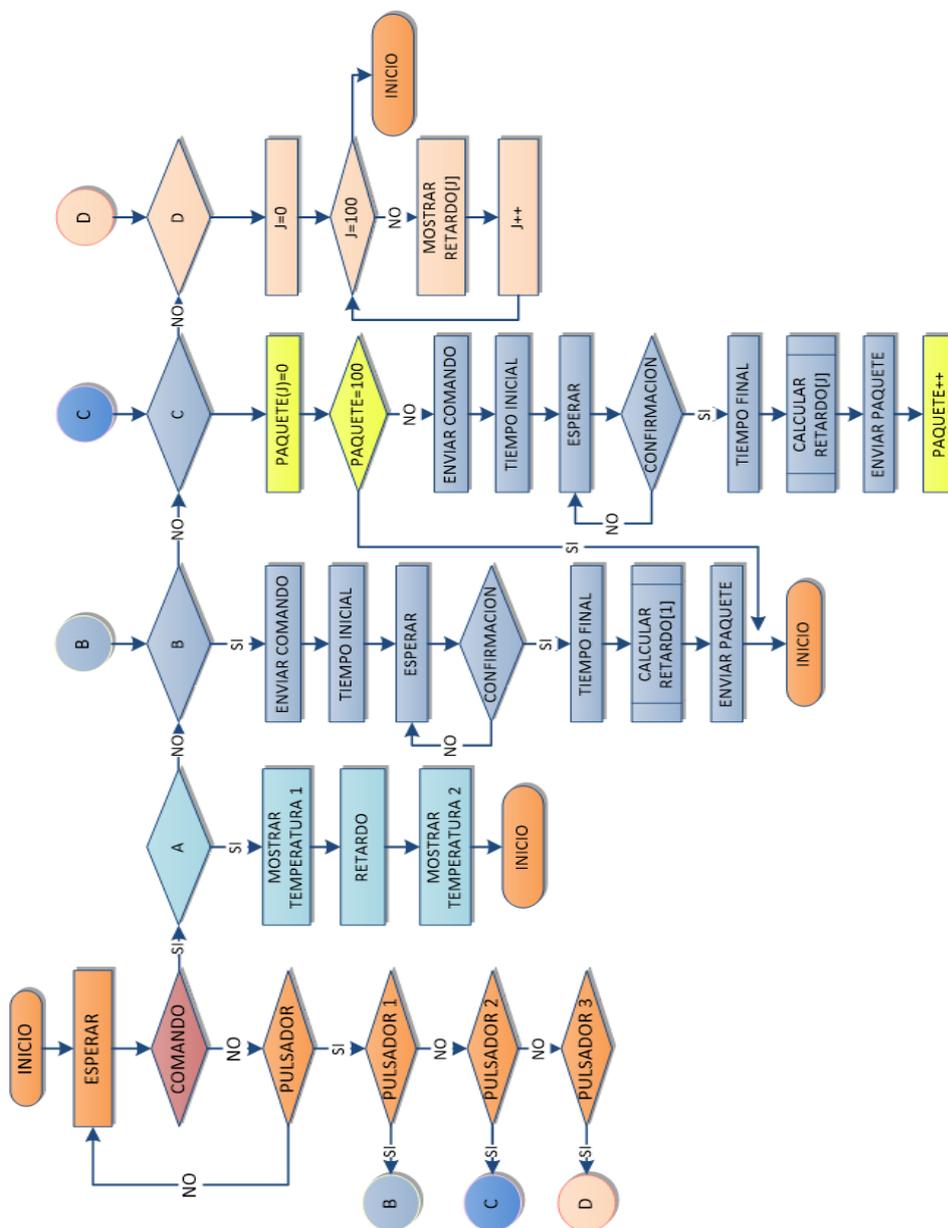


Figura J.1 Diagrama de flujo del transmisor.

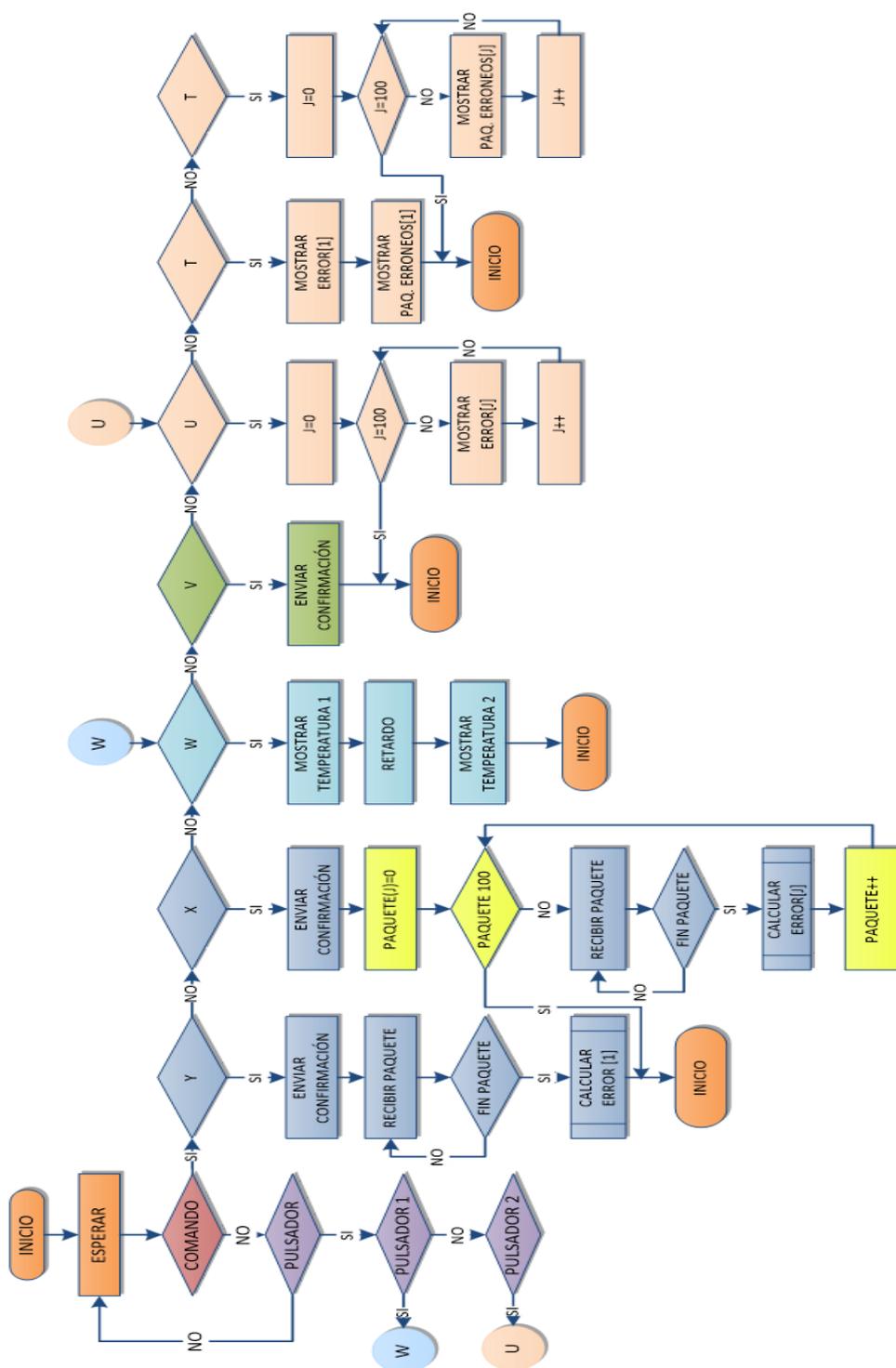


Figura J.2 Diagrama de flujo del receptor.

ANEXO K

RESULTADOS DE UNA RED PUNTO A PUNTO EN TIERRA

Tabla K.1: Tiempos en establecer el enlace en tierra.

D (m)	N	RETARDOS (ms)					
		RANGO	MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	VARIANZA
10	73	7,71	19,42	27,13	22,77	3,06	9,35
20	73	8,02	19,32	27,34	22,50	2,88	8,27
30	73	9,49	19,42	28,91	23,47	3,25	10,58
40	73	9,91	19,36	29,27	23,04	3,37	11,34
50	73	9,49	19,63	29,12	23,09	3,20	10,22
60	73	9,28	19,47	28,75	22,53	3,20	10,21
70	73	11,83	19,48	31,31	24,54	3,78	14,25
80	73	9,13	19,52	28,65	23,04	3,16	9,97
90	73	7,15	19,57	26,72	22,21	2,88	8,30
100	73	8,41	19,16	27,57	22,68	3,03	9,16

Tabla K.2: Pérdida de paquetes en el enlace en tierra.

DATOS FALLIDOS	D(M)	FRECUENCIA	PORCENTAJE
No	10	73	100
No	20	73	100
No	30	73	100
No	40	73	100
No	50	73	100
No	60	73	100
No	70	73	100
No	80	73	100
No	90	73	100
No	100	73	100

ANEXO L

RESULTADOS DE UNA RED PUNTO A PUNTO EN ENTORNOS ACUÁTICOS

Tabla L.1: Tiempos en establecer el enlace en entornos acuáticos.

D(m)	LUGAR	RETARDOS (ms)				
		MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA	VARIANZA	SD
50	TIERRA	20,380	45,328	32,35	112,07	10,59
80		20,850	46,310	34,74	96,43	9,82
20	TANQUE	20,094	45,014	25,45	41,74	6,46
27,3		22,470	54,130	38,71	105,21	10,26
28,6	PISCINA AGUA	12,234	28,540	18,70	24,47	4,95
28,6		11,706	23,896	17,57	14,44	3,80
28,6		12,020	27,288	18,03	20,30	4,51
20,3	PISCINA BORDE	10,556	24,118	16,50	13,99	3,74
40,6		12,138	25,466	17,60	17,91	4,23
60,9		12,232	24,852	16,40	13,32	3,65

Tabla L.2: Pérdida de paquetes en el enlace en diferentes entornos acuáticos.

D(m)	LUGAR	# MENSAJES EXITOSOS	# MENSAJES FALLIDOS
50	TIERRA	73	0
80		73	0
20	TANQUE	73	0
27,3		73	0
28,6	PISCINA AGUA	59	14
28,6		64	9
28,6		72	1
20,3	PISCINA BORDE	73	0
40,6		73	0
60,9		73	0

BIBLIOGRAFÍA

- [1] PRO ECUADOR Instituto de Promoción de exportaciones e inversiones. Pesca y Acuicultura [On-line]. Disponible en: <http://www.proecuador.gob.ec/compradores/oferta-exportable/fishing-and-aquaculture/>

- [2] Cámara Nacional de Acuicultura. Exportaciones por Mercado y País comparativo acumulado a Abril 2014 [On-line]. Disponible en: <http://www.cna-ecuador.com/estadisticas-cna/camaron/1334-camaron-abril-2014>

- [3] Petriella, A. M.; Boschi E. E. Crecimiento en crustáceos decápodos: de investigaciones realizadas en Argentina. Investigaciones marinas, 1997, pp.: 135-157. On-line ISSN: 0717-7178.

- [4] Bravo, Elizabeth. "Caso 2: La industria camaronera en el Ecuador". 2002.
- [5] Mathiesen, A. M. "The State of the World Fisheries and Aquaculture 2012". 2012.
- [6] X. Shen. et al., "Water Environment Monitoring System Based on Neural Networks for Shrimp Cultivation", Artificial Intelligence and Computational Intelligence, 2009. AICI '09. International Conference on, vol.3, pp.:427,431, 7-8 Nov. 2009. doi: 10.1109/AICI.2009.294
- [7] Jing Sun; Xiaofen Zhang, "Study of ZigBee Wireless Mesh Networks," Hybrid Intelligent Systems, 2009. HIS '09. Ninth International Conference on, vol.2, pp.: 264,267, 12-14 Aug. 2009. doi: 10.1109/HIS.2009.164
- [8] D. S. Simbeye. et al., Design and deployment of wireless sensor networks for aquaculture monitoring and control based on virtual instruments. Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 102, Sin publicar, pp.: 31-42.

- [9] E. Monachesi. *et al.*, “Física de las Ondas Radioelectricas dentro del Estándar IEEE802.11b”. *Efecto de la Foresta en las transmisiones electromagnéticas dentro de una WLAN (LAN inalámbrica)*. Proyecto de Investigación. U.T.N-F.R.T. Argentina.
- [10] Instituto Nacional de Estadística e Informática, Sub-Jefatura de Informática. “Redes Inalámbricas WIRELESS”. [INEI]: Colección Informativa fácil. pp.: 7-10, 16-17.
- [11] M. Medina; E. Arequipa. Implementación de un proveedor de servicio de internet inalámbrico en la ciudad de Nueva Loja. M.S. Tesis, Escuela Politécnica Nacional, Quito. Junio 2010.
- [12] E. F. Copas. *et al.*, “Wireless Mesh Networks: Estudio, Diseño y Aplicaciones”. UTN-Facultad Regional Tucumán.
- [13] F. Muñoz. *et al.*, “Redes Ad Hoc”. Informe de Computadoras I. Departamento de Electrónica-Universidad Técnica Federico Santa María.

- [14] J. Treviño & J. Silva, "Redes de sensores inalámbricas genérica". M.S. Tesis, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México. Mayo 2011.
- [15] Digi International. *Wireless Mesh Networking: ZigBee and DigiMesh* [Online]. Disponible en:
http://www.digi.com/pdf/wp_zigbeevsdigimesh.pdf
- [16] I. Vidri Salgado, "ZigBee y sus aplicaciones". Trabajo de investigación. Comunicaciones Industriales Avanzadas 2011-2012. Escuela Técnica Superior de Ingeniería-ICAI.
- [17] J. P. Dignani, "Análisis de protocolo Zigbee". M.S. Tesis. Facultad de Informática-Universidad Nacional de la Plata. Buenos Aires, Argentina. 2011.
- [18] G. Méndez Delgado. "ZigBee y sus aplicaciones en el monitoreo y control de procesos a distancia". M.S. Tesis. Facultad de ciencias- Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México. Julio 2009.

- [19] J. S. Paz. "Diseño y construcción de un módulo transmisor receptor inalámbrico para el manejo de sensores con el protocolo estándar IEEE 802.15.4 (Zigbee)". M.S. Tesis. Universidad Tecnológica de la Mixteca. Huajuapán de León, Oaxaca. Octubre 2008.
- [20] J. Martín & D. Ruiz. "Informe técnico: Protocolo ZigBee (IEEE 802.15.4)". Trabajo de investigación. Departamento de Tecnología y Computación-Universidad de Alicante, España. Junio 2007.
- [21] W. E. Barriga & F. P. Zúñiga. "Tecnologías inalámbricas de corto alcance: ZigBee y Bluetooth". M.S. Tesis. Ingeniería Electrónica CUE-Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador. Noviembre 2006.
- [22] R. Flickenger, "Una Introducción Práctica a la Física de Radio". *Redes inalámbricas en los países en desarrollo: una guía práctica para planificar y construir infraestructuras de telecomunicaciones de bajo costo, 3rd ed.* [Gran Bretaña]: Hacker Friendly LLC, 2008., 2008, cap.: 2, pp.: 17-23.

- [23] M. Perez Gracia. "Radar de subsuelo. Evaluación para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico". Ph.D. Tesis Doctoral. Universitat Politecnica de Catalunya, España. 2001.
- [24] S. R. Saunders, A. Aragón Zavala. "Propagation Mechanisms". *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems, 2nd ed.* Willey Editorial. Mayo 7, 2007. Cap.: 3.
- [25] *Arduino* [Online]. Disponible en: <http://arduino.cc/>
- [26] *DS18B20-Programmable Resolution 1-wire Digital Thermometer.* Maxim Integrated. REV 042208.
- [27] Digi International. *ConnectPort X Gateways* [Online]. Disponible en: http://www.digi.com/pdf/ds_connectportx.pdf
- [28] A. G. Smith. "Getting Started". *Introduction to Arduino: A piece of cake!*. CreateSpace Independent Publishing Platform. September 30, 2011. Cap.: 1.

- [29] Digi International. *Python Developer Resources* [Online]. Disponible en: <http://www.digi.com/technology/drop-in-networking/pdr>
- [30] Digi International. *XBee /XBee-PRO DigiMesh 2.4 OEM RF Modules* [Online]. Disponible en:
<https://www.eol.ucar.edu/system/files/XBee2.4.pdf>
- [31] Google Maps (ESPOL, Km 30.5, Vía Perimetral, Guayaquil-Vista tierra) [Online]. Disponible en:
<https://www.google.com.ec/maps/preview>
- [32] M. H. Badii, J. Castillo & A. Guillen. “Tamaño óptimo de la muestra (Optimum sample size)”. Trabajo de investigación. Universidad Autónoma de Nuevo León, México.
- [33] Digi International. *Product Manual: XBee /XBee-PRO DigiMesh 2.4 RF Modules* [Online]. Disponible en:
http://ftp1.digi.com/support/documentation/90000991_L.pdf