



PONTIFICIA **UNIVERSIDAD CATÓLICA** DEL PERÚ

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

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



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

DISEÑO DE UNA RED UTILIZANDO EL PROTOCOLO DE COMUNICACIONES ZIGBEE PARA EL SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE LA PLANTA ACUÍCOLA PUCP

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

ÁNGEL MALDONADO LAURENTE

**ASESOR: Ing. Ángelo Velarde Criado
Ing. César A. Carranza de la Cruz**

Lima, diciembre del 2008

RESUMEN

La acuicultura en el Perú es desarrollada de manera artesanal a pesar de tener un gran potencial de desarrollo, debido al uso de sistemas extensivos de baja productividad y de subsistencia. Por esta razón la acuicultura en el país no cuenta con las herramientas tecnológicas que faciliten un adecuado monitoreo y medición de parámetros de la calidad del agua a un bajo costo, de manera que durante las etapas de producción y comercialización de especies acuícolas se producen pérdidas significativas, además de no ofrecer la calidad necesaria del agua en los tanques de cultivo para asegurar el crecimiento óptimo de los peces.

Dada la problemática, es indispensable el uso de una alternativa tecnológica económica y eficiente a fin de asegurar el cultivo sostenible de Tilapia y garantizando la calidad del producto. En esta investigación se desarrolla el diseño de una red inalámbrica para realizar el monitoreo de parámetros críticos y contribuir a mantener los niveles óptimos de la calidad del agua durante el cultivo de Tilapia.

La infraestructura de comunicaciones está basada en la tecnología inalámbrica ZigBee, que es relativamente nueva y tiene un gran desarrollo en los últimos años. Esta tecnología es adecuada para aplicaciones de control y monitoreo en general, debido a sus características que le permiten manejar pequeñas tramas de información, con bajo consumo de corriente y a un costo reducido. También permite comunicaciones seguras y confiables, con la formación de redes estables muy grandes y la posibilidad de reconstrucción automática de la red cuando algún dispositivo crítico falla.

La investigación se encuentra desarrollada en cuatro capítulos. El primero presenta la problemática que envuelve al sistema de monitoreo de parámetros empírico con el que cuenta la planta, y el análisis de la misma llegando finalmente a la síntesis de la problemática. El segundo capítulo muestra los avances tecnológicos aplicados al monitoreo de parámetros en acuicultura, y los conceptos base que ayudarán a modelar teóricamente la solución planteada. En el tercer capítulo se plantea la hipótesis y se definen los objetivos de la investigación, además se realiza un análisis que permite identificar los requerimientos para el diseño de la red. El último capítulo contiene todo el desarrollo y la ingeniería del proyecto en sí, los detalles del diseño electrónico y de la programación utilizada en los dispositivos, así como las diferentes pruebas de campo realizadas para validar el diseño propuesto.



A mis padres Alejandro e Isidora, quienes con todo su apoyo y comprensión permiten que crezca día a día como persona y sea cada vez mejor. Les estoy eternamente agradecido.

ÍNDICE

ÍNDICE GENERAL	i
ÍNDICE DE TABLAS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: CULTIVO DE TILAPIAS Y EL PROCESO DE MEDICIÓN DE PARÁMETROS	3
1.1 El desarrollo de la acuicultura como actividad económica	4
1.2 Marco legislativo y condiciones del mercado	5
1.3 Conceptos básicos sobre acuicultura	6
1.3.1 Acuicultura	6
1.3.2 Tilapia	6
1.3.3 Sistema de recirculación	6
1.3.4 Parámetros críticos de la calidad del agua	7
1.3.4.1 Temperatura	7
1.3.4.2 Oxígeno disuelto	8
1.3.4.3 Ph	8
1.3.4.4 Dióxido de carbono	8
1.3.4.5 Alcalinidad	8
1.3.5 Características físico-químicas para el cultivo de Tilapia	8
1.4 Planta Acuícola PUCP	9
1.5 Proceso de monitoreo de parámetros en la Planta Acuícola PUCP y en el país	11
1.6 Factores que afectan al monitoreo de parámetros	14
1.7 Declaración del marco problemático	15
CAPÍTULO 2: TECNOLOGÍAS UTILIZADAS EN EL PROCESO DE MONITOREO EN ACUICULTURA	16
2.1 Tecnologías asociadas al monitoreo de parámetros	17
2.1.1 Presentación del asunto de estudio	17
2.1.2 El estado de la investigación	18
2.1.2.1 Sistemas de redes cableadas	19
2.1.2.1.1 Redes LAN	19
2.1.2.1.2 Redes de sensores industriales	19
2.1.2.2 Sistemas de redes inalámbricas	22
2.1.2.3 Sistemas de redes de sensores inalámbricas	24
2.1.3 Evolución de los sistemas de monitoreo	26

2.2 <u>Conceptualizaciones generales</u>	27
2.2.1 Redes de datos.....	27
2.2.2 Topologías de redes de datos.....	27
2.2.2.1 Topología anillo.....	27
2.2.2.2 Topología estrella.....	27
2.2.2.3 Topología bus.....	28
2.2.2.4 Topología árbol.....	28
2.2.2.5 Topología malla.....	28
2.2.2.6 Topología anillo-estrella.....	28
2.2.2.7 Topología bus-estrella.....	28
2.2.3 Protocolo inalámbrico ZigBee.....	29
2.2.3.1 Alianza ZigBee.....	29
2.2.3.2 IEEE 802.15.4.....	29
2.2.3.3 ZigBee.....	30
2.3 <u>Solución tecnológica</u>	31
2.3.1 Importancia del uso de la tecnología en acuicultura.....	31
2.3.2 Elección del sistema de comunicaciones.....	32
2.3.3 Modelo de la solución tecnológica.....	33
<u>CAPITULO 3: REQUERIMIENTOS PARA EL DISEÑO DE UNA RED INALÁMBRICA UTILIZANDO TECNOLOGÍA INALÁMBRICA ZIGBEE</u>	34
3.1 <u>Hipótesis de la investigación</u>	35
3.1.1. Hipótesis principal.....	35
3.1.2 Hipótesis secundarias.....	35
3.2 <u>Objetivos de la investigación</u>	35
3.2.1 Objetivo general.....	35
3.2.2 Objetivos específicos.....	35
3.3 <u>Universo y muestra</u>	36
3.4 <u>Situación actual y técnicas de medición de los parámetros críticos</u>	36
3.4.1 Infraestructura de la Planta Acuícola PUCP.....	36
3.4.2 Técnicas de medición de los parámetros críticos.....	37
3.5 <u>Requerimientos de Diseño</u>	39
<u>CAPITULO 4: DISEÑO DE UNA RED UTILIZANDO ZIGBEE PARA EL SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE LA PLANTA ACUÍCOLA PUCP</u>	41
4.1 <u>Análisis y selección del hardware</u>	42
4.1.1 Microcontrolador.....	42
4.1.2 Módulo transmisor-receptor ZigBee.....	42
4.1.2.1 Consideraciones.....	43

4.1.2.2 Tabla de fabricantes.....	43
4.1.2.3 Elección del módulo transmisor-receptor ZigBee.....	44
4.2 <u>Entorno de trabajo</u>	44
4.2.1 Hardware para el diseño de la red inalámbrica.....	44
4.2.1.1 Módulo XBee/XBee-Pro.....	45
4.2.1.2 Tarjeta de desarrollo XBee.....	46
4.2.2 Software para el diseño de la red inalámbrica.....	46
4.2.2.1 Software para el monitoreo de la red inalámbrica.....	47
4.2.2.2 Software para la configuración y el mantenimiento de la red.....	48
4.2.2.3 Software del nodo remoto y el nodo coordinador.....	48
4.2.2.4 Operación del módulo XBee/XBee-Pro.....	49
4.2.2.4.1 Direccionamiento.....	49
4.2.2.4.2 <i>Firmware XBee</i>	49
4.2.2.4.3 Comunicación Serial.....	50
4.2.2.4.4 Indicador de Potencia de la Señal Recibida (RSSI).....	52
4.3 <u>Desarrollo de la solución</u>	52
4.3.1 Descripción del Sistema.....	52
4.3.2 Arquitectura de la red.....	54
4.3.2.1 Arquitectura del nodo remoto.....	55
4.3.2.2 Arquitectura del dispositivo centralizado.....	58
4.3.2.3 Arquitectura de la estación base.....	61
4.3.2.4 Fuente de alimentación del nodo coordinador.....	63
4.4 <u>Pruebas realizadas</u>	65
4.4.1 Prueba de <i>Loopback</i>	65
4.4.2 Prueba de Cobertura.....	68
4.4.2.1 Herramienta utilizada.....	68
4.4.2.2 Pruebas de Cobertura del Pabellón de Electrónica, Informática y Telecomunicaciones.....	68
4.4.3 Transmisión de PC a PC utilizando el software X-CTU.....	71
4.4.4. Transmisión con el software de monitoreo AQUAPUCP v1.0.....	72
4.5 <u>Presentación del diseño</u>	73
4.5.1 Diagrama de la red.....	73
4.5.2 Tramas de transmisión y recepción.....	75
4.5.2.1 Sensores conectados al microcontrolador.....	75
4.5.2.2 Sensores conectados al módulo XBee.....	76
4.6 <u>Simulación de la red y puesta en funcionamiento</u>	77
4.6.1 Transmisión analógica y digital mediante el módulo XBee.....	77

4.6.2 Transmisión y recepción de datos digitales.....	79
4.6.3 Funcionamiento de la red inalámbrica.....	80
4.7 Presupuesto de la investigación	81
4.7.1 Costo de los componentes de la red Inalámbrica.....	81
4.7.2 Presupuesto total.....	84
<u>CONCLUSIONES</u>	86
<u>RECOMENDACIONES</u>	88
<u>FUENTES</u>	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Rangos óptimos para el cultivo de Tilapia.....	9
Tabla 2.1: Redes Industriales.....	20
Tabla 2.2: Tecnologías inalámbricas.....	22
Tabla 2.3: Clasificación de las redes de sensores inalámbricas.....	25
Tabla 4.1: Fabricantes de dispositivos ZigBee (Precios en dólares).....	43
Tabla 4.2: Características del módulo XBee/ XBee-Pro OEM RF.....	45
Tabla 4.3: Resultados de la prueba de <i>loopback</i>	67
Tabla 4.4: Resultados de la prueba de cobertura.....	69
Tabla 4.5: Configuración de la red inalámbrica.....	74
Tabla 4.6: Configuración del módulo XBee.....	78
Tabla 4.7: Costo de los equipos y materiales de un nodo remoto.....	82
Tabla 4.8: Costo de los equipos y materiales del nodo coordinador.....	83
Tabla 4.9: Costo de los componentes de la fuente de alimentación.....	83
Tabla 4.10: Costo de los equipos y materiales de la estación base.....	84
Tabla 4.11: Costo total del sistema.....	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Ubicación de la Planta Acuícola PUCP.....	10
Figura 1.2: Planta Acuícola PUCP.....	11
Figura 2.1: Estándar IEEE 802.15.4.....	29
Figura 2.2: Protocolo ZigBee.....	30
Figura 2.3: Modelo de la solución tecnológica.....	33
Figura 3.1: Planta Piloto PUCP.....	36
Figura 3.2: Medición de parámetros en la Planta Acuícola PUCP.....	38
Figura 4.1: Módulos XBee/XBee-Pro.....	46

Figura 4.2: Tarjeta de desarrollo XBee USB (izquierda) y RS-232 (derecha)..	46
Figura 4.3: Software de monitoreo AQUAPUCP v1.0.....	47
Figura 4.4: X-CTU.....	48
Figura 4.5:Control de Flujo de datos en un entorno con interfaz UART.....	50
Figura 4.6: Paquete 0x1F (número 31 decimal).....	51
Figura 4.7: Estructura de la trama de datos.....	52
Figura 4.8: Esquema general de la red de sensores inalámbrica.....	53
Figura 4.9: Arquitectura del nodo remoto.....	55
Figura 4.10: Esquemático del nodo remoto.....	57
Figura 4.11: Arquitectura del nodo coordinador.....	58
Figura 4.12: Esquemático del nodo coordinador.....	60
Figura 4.13: Arquitectura de la estación base.....	61
Figura 4.14: Esquemático de la estación base.....	62
Figura 4.15: Fuente de alimentación del nodo coordinador.....	64
Figura 4.16: Esquema de la prueba de <i>loopback</i>	65
Figura 4.17: Prueba de <i>loopback</i>	66
Figura 4.18: Cobertura y ubicación de la Estación Base en el tercer piso.....	70
Figura 4.19: Transmisión (izquierda) y recepción (derecha) usando X-CTU..	71
Figura 4.20: Resultados utilizando el software AQUAPUCP v1.0.....	72
Figura 4.21: Diagrama de la red inalámbrica.....	74
Figura 4.22:Formato de la trama enviada por el microcontrolador.....	75
Figura 4.23: Nodo1 (izquierda), nodo2 (centro) y coordinador(derecha).....	77
Figura 4.24:Sensor analógico y digital conectado al módulo XBee.....	78
Figura 4.25: Recepción de información analógica y digital en tramas API....	79
Figura 4.26: Sensor digital conectado al microcontrolador.....	80
Figura 4.27: Sistema de comunicaciones.....	80
Figura 4.28: Datos recibidos en la Estación Base.....	81

ANEXOS CONTENIDOS EN EL CD

ANEXO 1: PRUEBA DE LOOPBACK

ANEXO 2: PRUEBA DE COBERTURA

INTRODUCCIÓN

La acuicultura en el Perú tiene un gran potencial de desarrollo, sin embargo la tecnología requerida ha estado alejada de esta importante actividad económica debido al uso de sistemas extensivos de baja productividad y de subsistencia. En este sentido la Planta Acuícola PUCP fue construida con el objetivo de desarrollar tecnologías de precisión aplicados a la acuicultura para ser transferidos a otros centros acuícolas del país.

La Planta Acuícola PUCP tiene implementado un sistema de recirculación que busca mantener las condiciones óptimas para el cultivo de Tilapia. Para lograr esto es importante realizar el monitoreo de los parámetros críticos que afectan directamente a la calidad del agua, debido a que estos varían rápidamente en condiciones de cultivo de especies acuícolas.

Debido a la necesidad de automatizar el proceso de monitoreo de parámetros, se tienen tecnologías a nivel global como son los sistemas basados en redes cableadas, redes inalámbricas y redes de sensores inalámbricas. Las cuales permiten coleccionar la información adquirida de los parámetros críticos como la temperatura, el oxígeno disuelto, el pH y las concentraciones de CO₂.

La hipótesis de la investigación es dado que el monitoreo de parámetros en la Planta Acuícola PUCP es realizado de manera manual y basado en las condiciones actuales, generando una mala gestión de la unidad productiva. Entonces el diseño de una red inalámbrica permitirá la recolección automática de información relevante de la unidad de cultivo, permitiendo al acuicultor realizar una administración adecuada optimizando el proceso de producción.

El objetivo de la investigación es el diseño de una red inalámbrica utilizando el protocolo de comunicaciones ZigBee para el Sistema de Recirculación de la Planta Acuícola PUCP.

La metodología empleada consiste en realizar una investigación acerca de los conceptos básicos sobre acuicultura, los procesos de monitoreo utilizados actualmente y las diferentes tecnologías aplicadas para automatizar este proceso.

En el primer capítulo se analiza la problemática que envuelve al monitoreo de parámetros de la Planta Acuícola PUCP, encontrándose la necesidad de mejorar el sistema utilizado actualmente para optimizar la producción intensiva de Tilapia.

En el segundo capítulo se describen y analizan las diversas tecnologías que son utilizadas para realizar el monitoreo de parámetros en acuicultura. En base a esta información se realiza la elección de una tecnología adecuada a las necesidades de comunicación en la planta y finalmente se presenta el modelo de la solución tecnológica propuesta.

En el tercer capítulo se presentan los lineamientos generales para realizar el diseño de una red inalámbrica en la Planta Acuícola PUCP, para lo cual se declaran la hipótesis y los objetivos de la investigación. Luego se realiza un análisis al proceso de cultivo, en base a la experiencia obtenida y a la información brindada por especialistas, esto permite definir los requerimientos y especificaciones que serán tomados en cuenta a la hora de diseñar la red inalámbrica.

En el cuarto capítulo se desarrolla el diseño de la red inalámbrica, la cual permitirá la transmisión de información de la unidad de cultivo a una central de monitoreo. Se realiza la elección de los componentes de la red, se define la arquitectura de los nodos y se presenta el diagrama de la red. Posteriormente se realizan pruebas de campo que permiten validar el desempeño de la red inalámbrica cumpliendo con las especificaciones descritas.

Finalmente se presentan los resultados obtenidos durante la investigación, así como las conclusiones y recomendaciones que se deben tener en cuenta al momento de su implementación y puesta en funcionamiento.

CAPÍTULO 1: **CULTIVO DE TILAPIAS Y EL PROCESO DE MEDICIÓN DE PARÁMETROS**

La demanda de productos derivados de la acuicultura comercial por parte de los mercados internacionales es cada vez mayor, en este sentido es necesario realizar actividades que permitan generar tecnologías adecuadas para el desarrollo de la industria acuícola en el país.

En este capítulo se realiza una introducción a la acuicultura y el cultivo de Tilapia, luego se analiza la problemática que envuelve al sistema de monitoreo de parámetros utilizado en la Planta Acuícola PUCP y en los centros acuícolas del país, observando la situación en el medio general de la planta, los factores externos al monitoreo de parámetros y el método utilizado actualmente.

Finalmente se encuentra la necesidad de utilizar una tecnología adecuada para automatizar el proceso de monitoreo de la Planta Acuícola PUCP y otros centros acuícolas del país, que permita impulsar el desarrollo de esta importante actividad económica con el cultivo intensivo de especies acuícolas.

1.1 El desarrollo de la acuicultura como actividad económica

La acuicultura en el Perú es una actividad incipiente debido principalmente a que las acciones realizadas para fomentar esta importante actividad productiva han sido escasas. Sin embargo las posibilidades de desarrollar la acuicultura en el país son enormes ya que se cuenta con las condiciones propicias ofrecidas por la geografía nacional y la presencia de recursos acuíferos importantes. Los cuales actualmente no son utilizados o son utilizados deficientemente con cultivos extensivos de baja productividad y de subsistencia. [1]

Las actividades que se desarrollan en la acuicultura marina son la crianza de conchas de abanico y crustáceos con fines de exportación debido al alto costo que tienen en el mercado internacional.

En acuicultura continental se tiene la crianza de tilapia, camarón y langostino en la costa norte y en los manglares, lo cual genera problemas de depredación. El clima adecuado y la presencia de lagos y lagunas en la sierra hacen de ésta región propicia para el desarrollo de la acuicultura, donde actualmente se tiene el cultivo de trucha que requiere de una crianza controlada debido a la voracidad de esta especie. En la amazonía se desarrolla el cultivo de carpa y tilapia básicamente para el mercado local debido a la alta demanda que existe. [2]

Para impulsar el desarrollo de la acuicultura en el Perú, es necesario realizar actividades complementarias orientadas a la producción intensiva de especies acuícolas, buscando minimizar los problemas de contaminación ambiental y depredación generados en este tipo de cultivo. Estas actividades deben ayudar a obtener productos de excelente calidad con altos volúmenes de producción y un nivel adecuado de costos operativos. Lo cual permitirá su comercialización en el mercado nacional y su exportación a mercados exigentes aumentando el impacto de esta importante actividad productiva en la economía nacional.

Para la exportación de productos acuícolas a mercados internacionales y competir con otros productores de la región, es necesario tener un producto que cumpla con estándares de calidad adecuados que permitan asegurar altos volúmenes de producción durante todo el año. En este sentido se vienen realizando experiencias para el desarrollo de la acuicultura fomentados principalmente por el estado a través de instituciones públicas y apoyados en varios casos por empresas privadas.

Se tiene como ejemplo la estación piscícola de Quistococha en Iquitos y el Instituto de investigaciones de la amazonía peruana (IIAP), los cuales desarrollan la tecnología necesaria y adecuada para la reproducción y cría de especies amazónicas importantes como la gamitama, el paco y el boquichico. Como resultado se tiene el aumento en los volúmenes de producción, alcanzando las 10 toneladas anuales de pescado cultivado por hectárea de estanque. [2]

1.2 Marco legislativo y condiciones del mercado

El órgano encargado de las actividades relacionadas a la acuicultura es la Dirección General de Acuicultura que depende del Viceministerio de Producción, los órganos que lo conforman son la Dirección de Maricultura y la Dirección de Acuicultura Continental. [3]

La Dirección General de Acuicultura tiene como una de sus funciones supervisar el desarrollo de la actividad acuícola en el ámbito nacional y macroregional, velando por el cumplimiento de las políticas y normas aplicables. Otorga certificados para la importación, exportación y comercialización de especies provenientes de la acuicultura y su rango de acción también comprende la acuicultura a menor escala, la acuicultura de subsistencia y las investigaciones realizadas en áreas acuáticas públicas. [4]

El estado peruano a través del Ministerio de la Producción ha dictado las siguientes leyes, las cuales norman las actividades en este sector buscando promocionar el desarrollo de la acuicultura:

- Ley N° 27640. “Ley de promoción y desarrollo de la acuicultura” y su modificatoria Ley N° 28326.
- Decreto Supremo N° 030-2001-PE, que aprueba el Reglamento de la Ley N° 27640 y la modificatoria del Decreto Supremo N° 019-2003-PRODUCE.

Entre los beneficios se tiene la reducción del Impuesto a la Renta al 15%, la exoneración del impuesto extraordinario de solidaridad, la recuperación anticipada del IGV, la exoneración del pago por derecho de uso de agua y de área acuática para la acuicultura a las organizaciones sociales de pescadores artesanales y a las comunidades indígenas.

1.3 Conceptos básicos sobre acuicultura

En esta parte se describen aspectos generales sobre acuicultura, la especie a cultivar, los sistemas de recirculación y la importancia de los parámetros críticos en un sistema productivo. Estos conceptos son necesarios para comprender por completo el resto de la investigación.

1.3.1 Acuicultura

La acuicultura es el cultivo en el agua de especies vegetales y animales. Se incluyen peces, reptiles, anfibios, crustáceos, moluscos, plantas y algas destinados para alimento, investigación, conservación y/o su protección. [5]

Esta actividad es realizada en todo tipo de agua, desde agua dulce hasta agua salada que excede la salinidad del agua marina. Se realiza con la ayuda de estanques, tanques, canales de circulación rápidos, canales de riego, jaulas flotantes, jaulas fijas, jaulas sumergibles, canastas suspendidas y estantes. [6]

1.3.2 Tilapia

La Tilapia es una especie íctica, cuyo cultivo se inició en 1820 en África, extendiéndose a gran parte del mundo. Actualmente es considerada la tercera especie más cultivada después de las Carpas y los Salmónidos, su cultivo se incrementa anualmente y se estima que será el más importante en las próximas décadas.

La Tilapia es resistente a muchas enfermedades, se reproduce con facilidad, consume una gran variedad de alimentos y tolera aguas con bajas concentraciones de oxígeno disuelto. Comúnmente, es cultivada en estanques, tanques y jaulas. La mayoría de las especies de Tilapia pueden crecer en agua dulce y algunas se adaptan al agua de mar. Todas estas características hacen que la Tilapia sea una especie de cultivo apta en la mayoría de los países en vías de desarrollo.[7]

1.3.3 Sistema de recirculación

Es un sistema donde el recambio diario del agua en los tanques de cultivo es menor al 10% del volumen total, para lograr esto se tiene un grupo de componentes que

en conjunto crean un ambiente artificial favorable para producir y reproducir organismos acuáticos, siendo confiable, económico y compatible con el usuario. [8]

Se tiene un estándar de la calidad del agua para sistemas cerrados a nivel biológico y físico-químico, el cual define los rangos permitidos de los siguientes parámetros: oxígeno disuelto, Nitrógeno Amoniacal Total (NAT), NO_2 , temperatura, pH, CO_2 , alcalinidad, salinidad y sólidos disueltos.

1.3.4 Parámetros críticos de la calidad del agua

Los criterios de la calidad del agua para acuicultura consideran típicamente parámetros como la temperatura, el oxígeno disuelto, concentraciones de CO_2 , amonio y nitritos. Muchos de los cuales están enfocados en la protección del entorno acuático de una amplia gama de especies y etapas de cultivo.

Algunos de estos criterios no son apropiados para una especie específica y etapa de desarrollo, especialmente en aplicaciones comerciales. Los valores de un determinado criterio de la calidad del agua dependen en gran medida de la especie, el tamaño y los objetivos de cultivo. En los sistemas de recirculación de agua, los sólidos disueltos, residuos orgánicos, composición de los alimentos, metales y nitratos pueden llegar a ser importantes.

En esta investigación se utiliza el criterio de la calidad del agua para protección del entorno acuático, presentando a continuación información detallada de los parámetros críticos más importantes en los sistemas de recirculación.

1.3.4.1 Temperatura

La temperatura del agua controla la tasa de metabolismo de todos los organismos del sistema acuático, la máxima cantidad de gases disueltos presentes y el nivel de oxígeno disuelto que el agua puede contener. Cuando la temperatura aumenta, la cantidad de oxígeno disuelto en el agua disminuye, mientras que la tasa de oxígeno consumido por los organismos acuáticos se incrementa. [8]

Se debe mantener dentro del rango adecuado para un óptimo crecimiento de las especies cultivadas, a temperaturas óptimas los pescados crecen rápidamente, convierten la comida eficientemente y son inmunes a muchas enfermedades.

1.3.4.2 Oxígeno disuelto

El oxígeno gaseoso es un gas poco soluble y se encuentra en el agua en pocas cantidades. Para soportar la respiración de las plantas, animales y bacterias en el entorno acuático se requiere una concentración mínima de oxígeno disuelto, la cual generalmente debe mantenerse cerca de 5-6 mg/L para obtener una adecuada tasa de crecimiento de las especies cultivadas. [9]

1.3.4.3 Ph

Representa las características ácidas o básicas que presenta el agua, específicamente el pH indica las concentraciones de iones de hidrógeno en el agua. El agua es considerada ácida cuando el pH es inferior a 7 y básica cuando el pH está por encima de 7. Las concentraciones altas de la forma tóxica de amoníaco son formados en aguas básicas, mientras que concentraciones bajas de la forma menos tóxica de amoníaco NH_4^+ están presentes en aguas ácidas. Los pescados en general pueden tolerar un rango de pH desde 6 hasta 9.5, sin embargo un cambio del nivel de pH de dos unidades o más es muy perjudicial. [9]

1.3.4.4 Dióxido de carbono

El CO_2 es 30 veces más soluble en el agua que el oxígeno, la condición de saturación es definida por la temperatura y la presión que ejerce el gas CO_2 . Generalmente se nota niveles sobresaturados de CO_2 , ya que las actividades de respiración producen más CO_2 de lo que se elimina mediante el proceso de aireación. Típicamente los peces de agua dulce soportan entre 100 y 200 mg/L. [9]

1.3.4.5 Alcalinidad

Es la medida de la capacidad del agua a resistir cambios en los niveles de pH o la habilidad de neutralizar la acidez del agua.

1.3.5 Características físico-químicas para el cultivo de Tilapia

En la tabla 1.1 se muestran las características físico-químicas adecuadas de la calidad del agua para el cultivo de Tilapia. Luego se describen los problemas que se generan cuando estos parámetros críticos superan los valores permitidos. [10]

PARÁMETRO	MÍNIMO	ÓPTIMO	MÁXIMO
Temperatura	15 °C	24-35 °C	37 °C
Oxígeno Disuelto	2 mg/L	3-5mg/L	25 mg/L
PH	5	6.5-7.5	11
Dióxido de carbono	24 ppm	50-100 ppm	120 ppm

Tabla 1.1: Rangos óptimos para el cultivo de Tilapia [10]

El rango óptimo de temperatura está entre los 25°C y 35°C. Cuando la temperatura desciende por debajo de los 15°C los peces dejan de comer y si desciende a menos de 12°C los peces no viven por mucho tiempo. Si la temperatura excede los 37°C se presentan problemas generados por el estrés.

La Tilapia puede vivir en condiciones ambientales adversas debido a que soporta bajas concentraciones de oxígeno disuelto. Ello se debe a la capacidad de su sangre a saturarse de oxígeno aún cuando la presión parcial de este sea baja, la Tilapia tiene la facultad de reducir su consumo de oxígeno cuando la concentración en el medio es baja (inferior a 3mg/L). Finalmente cuando esta concentración disminuye hasta 0.5mg/L o menos, su metabolismo se vuelve anaeróbico. [10]

La Tilapia crece mejor en aguas de pH neutro o levemente alcalino, su crecimiento se reduce en aguas ácidas pudiendo tolerar hasta un pH de 5, el límite para un nivel alto de pH es 11 ya que a este nivel el amonio se transforma en amoníaco tóxico.

La Tilapia soporta concentraciones altas de hasta 120 ppm de CO₂, este nivel es considerado tóxico debido a que a niveles altos de CO₂ se forman depósitos calcáreos en los riñones de los peces.

1.4 Planta Acuícola PUCP

La Planta Acuícola PUCP se encuentra en la zona sur-oeste del campus de la Pontificia Universidad Católica del Perú, del distrito de San Miguel, provincia de Lima Metropolitana, departamento de Lima. La instalación de la planta se realizó en el área que corresponde al invernadero del Grupo de Apoyo al Sector Rural, cuenta con un área aproximada de 40 metros cuadrados y actualmente se realiza el cultivo de Tilapia. En la figura 1.1 se muestra la ubicación de la planta dentro del campus.



Figura 1.1: Ubicación de la Planta Acuícola PUCP [11]

La construcción de la Planta Acuícola PUCP se realizó durante el mes de julio del año 2007, como parte del proyecto DAI “Diseño y construcción de una Planta piloto de crianza intensiva de Tilapias para desarrollar tecnologías de monitoreo y control de los parámetros críticos para la etapa de engorde de Tilapias”. La planta comenzó a funcionar en el mes de septiembre del mismo año con el cultivo de las variedades azul y roja de Tilapia cuya denominación científica es *Oreochromis niloticus*.

La Planta Acuícola PUCP fue construida con el objetivo de desarrollar tecnologías puntuales asociadas al proceso de producción, las cuales serán transferidas y aplicadas a otros centros acuícolas del país. De esta manera se busca optimizar el proceso productivo para el cultivo intensivo de especies acuícolas fomentando el desarrollo de esta importante actividad económica.

La planta tiene implementado un sistema de recirculación que permite mantener niveles óptimos de la calidad del agua de cultivo con bajos niveles de recambio del agua. Este sistema de recirculación se muestra en la figura 1.2, donde se observa que cuenta con dos tanques de cultivo, un tanque de compensación, un biofiltro tipo Venturi, una bomba, válvulas y conexiones de tuberías CPVC.



Figura 1.2: Planta Acuícola PUCP

1.5 Proceso de monitoreo de parámetros en la Planta Acuícola PUCP y en el país

El sistema de producción en los centros acuícolas del país y en la Planta Acuícola PUCP es artesanal, consiste en la dotación manual de alimento y la medición de los parámetros críticos de forma individual. Se realiza de esta manera debido a la ausencia de la tecnología adecuada que permita automatizar estas labores a lo largo de toda la cadena productiva.

El monitoreo de parámetros en la Planta Acuícola PUCP y en otros centros acuícolas es realizado utilizando el método manual basado en la observación. Este método consiste en la medición de cada parámetro por separado verificando las condiciones actuales de la unidad de cultivo. Las mediciones son realizadas en instantes definidos por la experiencia del personal a cargo y en la observación de las características del entorno de producción antes de realizar una medición.

Se registra cada una de estas mediciones y en base a esta información se toman decisiones que buscan corregir desviaciones que afectan a la calidad del agua, buscando un equilibrio entre los diferentes parámetros críticos que aseguren un entorno adecuado para el óptimo crecimiento de las especies cultivadas.

Este sistema de monitoreo es un proceso empírico, ya que es realizado basado en la observación de las condiciones actuales de la unidad de cultivo y en la experiencia del personal a cargo, quien realiza las mediciones verificando que estas correspondan a valores reales. Como los niveles de los parámetros críticos varían rápidamente en condiciones de operación, las mediciones son realizadas de manera constante durante cortos intervalos de tiempo definidos por el personal a cargo y el calendario establecido por el centro acuícola.

La medición de los parámetros mediante este método es ineficiente debido al uso de equipos de medición inadecuados y a condiciones externas que afectan y generan errores adicionales. Entre estos se tiene el error producido en la lectura de los instrumentos y el error debido a una incorrecta manipulación, los cuales sumados se vuelven considerables e inducen a tomar decisiones equivocadas.

Este proceso es lento porque se realiza independientemente para cada parámetro crítico y se tiene un tiempo prolongado por la ejecución de varias etapas antes de realizar una medición. Estas son calibrar el instrumento de medición, determinar el lugar adecuado para realizar la medición en base a las condiciones actuales y esperar el tiempo necesario para el establecimiento del entorno. Luego se procede a realizar la medición y analizar el resultado para determinar si esta medición es correcta, en caso no corresponda a un valor adecuado se repite este proceso. En muchas ocasiones se realiza mediciones en diferentes puntos del tanque para obtener un promedio del parámetro a evaluar y finalmente se procede a registrar la información adquirida en un formulario.

La medición es realizada para cada parámetro, esta operación se repite para todos los demás parámetros críticos del tanque de cultivo y se procede a hacer lo mismo para todos los tanques restantes de la unidad de cultivo, el tiempo total para realizar todas las mediciones dependerá del tamaño de la planta. Finalmente se procede a reportar los resultados obtenidos de manera escrita o vía oral a los encargados de la administración de la unidad de producción. No se cuenta con un adecuado manejo de la información obtenida durante este proceso.

Para contrastar el método que se utiliza en la Planta Acuícola PUCP se presenta el método utilizado en el Criadero de Truchas de Ingenio ubicado a 3245 m.s.n.m. en el departamento de Junín, provincia de Huancayo, distrito de Concepción.

Este centro de cultivo cuenta con muchos años de experiencia y abastece a la población del Valle del Mantaro, la Oroya y la ciudad de Lima, siendo estos últimos su principal mercado. El centro tiene una capacidad para cultivar 2 millones de ovas, 1.8 millones de alevines y 154 000 Kg de truchas. [12]

Los parámetros que se monitorean periódicamente en este criadero de truchas son el oxígeno disuelto, los niveles de dióxido de carbono presentes en el agua, la temperatura con una mínima de 11°C y una máxima de 14°C, siendo la temperatura promedio de 12.5°C al medio día, y el pH presente en cada uno de los estanques. Los demás parámetros físico-químicos no son analizados frecuentemente y no se tiene ninguna variación importante de estos. [13]

El alimento balanceado proviene de lima por parte de Purina y el control sanitario sólo se basa en el recambio de agua y un proceso de desinfección periódica de los estanques. Se realiza un mantenimiento preventivo del centro con recambios de agua y limpieza en los estanques cada 12 días aproximadamente. [13]

Las dimensiones de los estanques están en relación a la etapa de crianza de los peces, se tiene el tamaño estándar de 5m de ancho, 25m de largo y 1.2m de profundidad total. No se cuenta con estanques de reserva, el agua es reutilizada hasta cuatro veces en la etapa de comerciales y dos veces en la etapa de reproductores.

El monitoreo de los parámetros y el análisis físico-químico lo realiza la bióloga del centro de Ingenio. Los informes de estos análisis son desarrollados por el personal calificado de Huancayo que realiza visitas periódicas al centro de crianza. [14]

El caudal del agua que ingresa a los estanques es constante, por esto en época de lluvias sólo se controla el volumen que ingresa al centro mas no la turbidez, sin embargo la cantidad de caudal es importante porque ayuda a metabolizar y digerir los alimentos. Al ingresar mayor cantidad de oxígeno se convierte de manera eficaz el alimento en energía y el pez se desarrolla más rápido, esto genera mayor producción de desechos orgánicos, lo que a su vez provoca cambios en el pH.

1.6 Factores que afectan al monitoreo de parámetros

El auge de la acuicultura en los últimos años ha contribuido a la toma de conciencia por parte de la sociedad de la importancia de esta importante actividad económica, tomando especial cuidado en los problemas que genera la acuicultura como son la contaminación ambiental y la depredación debido a la gran demanda que existe. De esta manera se crea la necesidad de establecer normas y estándares que protejan y regulen la actividad acuícola, garantizando la calidad del producto para su comercialización con un adecuado uso de los recursos naturales.

En el mercado internacional cada vez se requieren mayores cantidades de productos provenientes de la acuicultura, el consumo actual alcanza aproximadamente el 50 % del volumen total de las especies consumidas. [15]

Con la utilización de la tecnología adecuada para el cultivo de especies acuícolas, se busca crear el entorno favorable para la producción intensiva de especies como la Tilapia. Esto permitirá obtener un producto de calidad que podrá ser comercializado en el mercado nacional y exportado a mercados exigentes.

El FONDEPES es la entidad encargada de velar por el cumplimiento de las normas dadas para la actividad acuícola, fomentando el desarrollo de la acuicultura a nivel nacional. Para realizar actividades referidas a la acuicultura es necesario contar con la certificación y los permisos expedidos por este organismo.

El uso de sistemas extensivos de baja productividad y de subsistencia para la producción de especies acuícolas en el país, no ha permitido el uso de las herramientas tecnológicas que brinden la sostenibilidad y competitividad a esta importante actividad. El costo elevado de los equipos necesarios para el análisis y control que aseguran una adecuada producción determinó el poco uso de estos en acuicultura, teniendo un retraso notorio a comparación de otros países de la región.

Los centros de acuicultura en general y la Planta Acuícola PUCP carecen de la infraestructura adecuada que permita la automatización de los procesos productivos y específicamente de la infraestructura de comunicaciones que permita el acceso adecuado y eficiente a la información de las mediciones realizadas. Tampoco se cuenta con el personal calificado y competente para realizar las diferentes actividades relacionadas con el manejo de los sistemas presentes en la planta.

El uso de sistemas de monitoreo y control en la acuicultura son cada vez más utilizados en países en vías de desarrollo, por ello la Planta Acuícola PUCP tiene como objetivo el desarrollo de tecnologías de precisión específicas para la acuicultura. Buscando el apoyo de entidades nacionales y extranjeras interesadas en impulsar este importante sector productivo.

1.7 Declaración del marco problemático

Los sistemas de producción en acuicultura deben proporcionar un ambiente adecuado para el crecimiento óptimo de las especies acuícolas. Donde los parámetros críticos deben ser monitoreados constantemente para garantizar la calidad del agua que permita producir y reproducir especies de manera rentable.

En el país el proceso de monitoreo es desarrollado de manera artesanal con la técnica manual basada en la observación. Esta consiste en la compra de kits de medición de acuerdo a cada parámetro crítico, realizando la medición de cada parámetro en lugares y frecuencias establecidas por la experiencia del personal.

Debido a que la ubicación de los lugares donde se realizan las mediciones depende únicamente de la observación de las condiciones actuales, el personal encargado para dicha labor debido a su falta de experiencia puede tomar medidas erróneas que llevan a tomar decisiones equivocadas que afectan a la calidad del agua.

Con el método manual se tiene la posibilidad de realizar las mediciones en momentos diferentes a los establecidos, debido al riesgo de olvido que existe por parte del personal encargado, lo cual tiene efectos negativos en la calidad del agua afectando a la producción de la unidad de cultivo.

Al cultivar organismos acuáticos se debe tener un especial cuidado ya que estos soportan un gradiente máximo, por encima del cual se tienen problemas que deben ser corregidos a tiempo para asegurar niveles óptimos de la calidad del agua sin perder la producción ó obtener un producto de menor calidad.

En el caso de la temperatura se tiene que si ésta desciende por debajo de los 15°C los peces dejan de comer y si baja a menos de 12°C las Tilapias mueren. Una variación de pH de hasta dos niveles resulta muy perjudicial, mientras que los bajos niveles de oxígeno disuelto determinan una tasa de crecimiento deficiente.

CAPÍTULO 2: **TECNOLOGÍAS UTILIZADAS EN EL PROCESO DE MONITOREO EN** **ACUICULTURA**

Dada la necesidad de ofrecer una alternativa adecuada para el monitoreo de parámetros en la unidad de cultivo, se busca tener un sistema de monitoreo eficiente que permita un manejo adecuado de la información de los parámetros críticos que afectan directamente a la calidad del agua del sistema de producción.

En este capítulo se presentan las tecnologías utilizadas para el monitoreo y transporte de la información de los parámetros críticos, las cuales incluyen a los sistemas de redes cableadas, sistemas de redes inalámbricas y a los sistemas de redes de sensores inalámbricas. También se describen los sistemas comerciales de monitoreo, lo cual permitirá obtener una idea general acerca del uso de estas tecnologías en acuicultura.

Se muestran las principales características de cada tecnología, las áreas de operación, el estándar que utilizan y en base a esta información se realiza un análisis para determinar la tecnología adecuada que será utilizada en la red inalámbrica que permita realizar el monitoreo de parámetros de la planta acuícola.

Finalmente se definen los diferentes aspectos básicos que se tendrán en cuenta durante el desarrollo de la investigación, para lo cual se propone un modelo teórico de la solución tecnológica para la red inalámbrica a diseñar.

2.1 Tecnologías asociadas al monitoreo de parámetros

En esta sección se describe el asunto de estudio y se desarrolla la investigación de las diferentes tecnologías utilizadas para la transferencia de información dentro de los sistemas productivos y especialmente en la acuicultura.

2.1.1 Presentación del asunto de estudio

La acuicultura es el cultivo de organismos acuáticos en condiciones controladas, donde la meta es obtener un producto de la manera más eficiente en términos de producción y costos. [16]

Para lograr este propósito se han buscado diferentes soluciones para aminorar efectos como la capacidad de terrenos, el agua y el impacto de la contaminación ambiental. En este sentido hay un creciente interés por los sistemas de recirculación donde el recambio de agua es menor al 10% del volumen total del agua de cultivo. Para lo cual se debe tener un grupo de componentes que en conjunto generan un ambiente con condiciones óptimas y controladas para producir y reproducir organismos acuáticos.

Estos sistemas deben ser confiables, económicos y compatibles con los usuarios, teniendo además un estándar a nivel biológico y físico-químico de la calidad del agua de la unidad de cultivo.

En este sistema de recirculación se busca realizar el monitoreo de los parámetros críticos como la temperatura, el oxígeno disuelto, las concentraciones de CO₂ y los niveles de pH, los cuales afectan directamente a la calidad del agua. Esto permitirá obtener un balance de masa adecuado, equilibrar la capacidad de carga en el sistema de recirculación, obtener un aumento en las tasas de crecimiento, aumento en la tasa de conversión de alimento, reducir la susceptibilidad a enfermedades y disminuir la tasa de mortalidad.

La acuicultura tiene un gran potencial de desarrollo en el país, actividad que dotada de un sistema de monitoreo adecuado permitirá la administración y gestión del sistema productivo. El grado óptimo de calidad del agua para el cultivo intensivo de Tilapia y una alimentación adecuada, conducirá a un aumento de la producción y una consecuente reducción de los costos operativos.

El desarrollo de la tecnología permite ofrecer alternativas para mejorar los sistemas de adquisición y monitoreo garantizando que la transmisión de información será realizada de manera instantánea y segura.

De esta manera se observa la necesidad de realizar el diseño de un sistema de monitoreo de parámetros críticos para la Planta Acuícola PUCP. En este sentido es necesario plantear una solución tecnológica para la infraestructura de comunicaciones coherente con la realidad nacional, lo cual será posible gracias al análisis de las diferentes tecnologías que son utilizadas en la industria.

2.1.2 El estado de la investigación

Para el monitoreo de los parámetros críticos, se tienen diversos métodos de transmisión de información a través de medios físicos como cables, fibra óptica y el aire. En la industria y específicamente en la acuicultura se tienen soluciones tecnológicas implementadas, las cuales se agrupan en:

- Sistemas de redes cableadas.
- Sistemas de redes inalámbricas.
- Sistemas de redes de sensores inalámbricas.

La tecnología que se utilizará, dependerá de los requerimientos establecidos por la unidad de producción, los cuales varían de acuerdo a la infraestructura y recursos que posee el centro de producción acuícola.

Se debe tener en cuenta que la comunicación e interconexión entre los dispositivos de medición de parámetros y el centro de monitoreo debe brindar un nivel de eficiencia adecuado que permita un sistema fiable, seguro, rápido y con bajas tasas de error. El costo de la implementación del sistema, el consumo y el mantenimiento deberán ser asequibles por el acuicultor para poder ser implementados en el país.

A continuación se desarrollan ampliamente estos sistemas y se describen las principales características de las tecnologías y los protocolos utilizados, así como las diferentes soluciones involucradas en el monitoreo de parámetros. Esto permite conocer ampliamente el uso de estas tecnologías aplicadas al caso de estudio, y tomando como base esta información se realizará un análisis para determinar y seleccionar la solución tecnológica adecuada para el monitoreo de parámetros.

2.1.2.1 Sistemas de redes cableadas

Los sistemas cableados fueron muy utilizados en el pasado. Entre las características que son comunes a estos sistemas se tienen:

- La alimentación de los equipos es realizada mediante cables.
- La red es densamente cableada.
- La instalación y el mantenimiento es costoso.

Se describen las tecnologías asociadas con la transmisión de información sobre redes cableadas, las cuales en muchos casos requieren complejos y costosos sistemas de adquisición y acondicionamiento de la señal.

2.1.2.1.1 Redes LAN

Son sistemas de comunicación de datos que permiten a un determinado número de dispositivos independientes comunicarse en una área local. Las comunicaciones están confinadas a un área geográfica, operan sobre velocidades medias y altas con bajo porcentaje de error y se comunican sobre un medio físico común para el enlace punto a punto. Entre las aplicaciones se tienen el procesamiento de datos, la automatización de oficinas y fábricas, y la administración de energía.

Para la automatización de fábricas se tienen implementados el diseño asistido por computadora (CAD) y la fabricación asistida por computadora (CAM), las cuales utilizan redes LAN. Las topologías utilizadas en las redes LAN son estrella, anillo, bus y hub, teniendo como métodos de acceso al medio CSMA/CD, Ethernet IEEE 802.3 y Token Ring IEEE 802.5. [17]

2.1.2.1.2 Redes de sensores industriales

En la industria se incluyen sensores y actuadores conectados directamente a los procesos industriales. Las aplicaciones típicas de estas redes están en la industria automotriz, aeronáutica y aeroespacial, son utilizadas también en la automatización de procesos industriales y de edificios inteligentes.

Las redes de sensores industriales son de tres tipos: redes de sensores y actuadores conectados al mismo sistema de cables, buses de dispositivos

caracterizados por un mayor campo de paquetes de datos actuando como un poderoso sistema de comunicación serial y buses de campo para un control jerárquico con altos niveles de adquisición de datos usado para sistemas complejos de medición y adquisición de datos. [18]

Se muestra en la tabla 2.1 el resumen de las principales características de los diferentes protocolos utilizados en las redes de sensores industriales y clasificados según el método de acceso al medio que emplean. Luego se mencionan las áreas de aplicación donde son empleados estos protocolos.

Tecnología	Topología	Longitud	Modulación	Cableado	Velocidad de Transmisión
METODO DE ACCESO AL MEDIO: MAESTRO/ESCLAVO					
HART	Punto a punto	3000 m	FSK	Par trenzado	1.2 Kbps
	Bus				19.2 Kbps
ASI	Bus, árbol	100 m	APM	Par no trenzado y sin blindaje	156 Kbps
Interbus	Anillo	13 Km	RS 485	Par no trenzado sin blindaje	500 Kbps 300 Kbps
Measurement BUS	Bus	500 m	NRZ	Dos pares trenzados	115.2 Kbps
Sercos	Anillo	50 m	NRZI	Fibra óptica	2 a 4 Mbps
Bitbus	Bus	13.2 Km	NRZ	Par trenzado	62.5 Kbps
			NRZI	Fibra óptica	
Profibus	Bus	9.6 Km	NRZ	Par trenzado blindado	9.6 Kbps 12 Mbps
Microwire	Bus	100 m	NRZ	Par trenzado	14.4 Kbps
METODO DE ACCESO AL MEDIO: CSMA/CA					
CAN	Bus	1000 m	Niveles diferenciales	Par blindado, fibra óptica	50 Kbps
		40 m			1 Mbps
METODO DE ACCESO AL MEDIO: CSMA/CD					
Lon Works	Árbol	Variable	NRZ	Par trenzado Cable coaxial	79 Kbps

Tabla 2.1: Redes Industriales [18]

El protocolo HART es utilizado para propósitos de medición y redes. Está presente en un gran número de sensores y actuadores de muchos fabricantes del mercado, entre ellos Emerson, Siemens y ABB. Las áreas de aplicación son temperatura, presión, flujo, densidad, nivel y actuadores.

El protocolo ASI es utilizado en la automatización de máquinas y líneas de producción. Lo utilizan más de 32 fabricantes como Siemens y Bernstein. Las áreas de aplicación son sensores digitales, actuadores y módulos de entrada-salida.

El protocolo Interbus es uno de los primeros protocolos propietarios utilizado para buses de sensores/actuadores y dispositivos de comunicación adecuados para la adquisición de datos y control en tiempo real.

El protocolo Measurement Bus es utilizado para realizar mediciones. Este protocolo tiene muchos mecanismos de seguridad como control de paridad, checksum y el tiempo límite de recepción. Las áreas de aplicación son conductividad, concentraciones de gas, luces, temperatura, pH y actuadores.

El protocolo Sercos permite un sistema de comunicación serial en tiempo real, desarrollado para los instrumentos de CNC (control numérico por computadora) y para la conexión directa de sensores y actuadores convencionales. Las áreas de aplicación son CNC, control de movimiento y módulos de entrada-salida.

El protocolo Bitbus, desarrollado por Intel permite conectar hasta 28 nodos a una distancia de 30 m. Fue utilizado en muchas aplicaciones del pasado y no cuenta con la capacidad de la conexión directa de sensores. Las áreas de aplicación son controladores y módulos de entrada-salida.

El protocolo ProfiBus es un estándar de comunicación industrial alemán, para redes de sensores y automatización. Es utilizado por muchos fabricantes como FRABA, Siemens, Emerson y Séller HCW. Las áreas de aplicación son flujo, presión, temperatura, posición y codificadores.

El protocolo Microwire es la base del estándar IEEE 1451.4 y de la tecnología del microcontrolador Dallas, el cual habilita la conexión de hasta 8 esclavos a una distancia máxima de 100 metros. Es utilizado en la automatización de edificios y en el área de temperatura para la automatización de estaciones meteorológicas.

El protocolo CAN es utilizado en la automatización de vehículos, edificios, ascensores y maquinaria industrial. Se basa en el envío de mensajes que contienen un identificador que define el contenido y prioridad de la información transmitida.[19]

El protocolo LongWorks es ampliamente utilizado en las construcciones de edificios, en los sistemas de control y adquisición SCADA, y en los sistemas de transporte. Las áreas de aplicación son la industria, maquinarias y módulos de entrada-salida.

2.1.2.2 Sistemas de redes inalámbricas

En el presente es muy difundido el uso de las comunicaciones inalámbricas. Las características que son comunes a este tipo de comunicación son:

- La alimentación es realizada mediante cables conectados a la red eléctrica o con el uso de dispositivos de almacenamiento de energía recargables.
- La red tiene un cableado poco denso.
- La configuración y el mantenimiento de la red es costoso.

En la tabla 2.2 se muestran las principales características de las tecnologías inalámbricas que son utilizadas para la transmisión de información en sistemas de monitoreo y control de procesos.

Tecnología	Estándar	Uso	Modulación	Frecuencia	Velocidad de Transmisión	Longitud
Wi-Fi	802.11a	LAN	8OFDM	5 GHz	54 Mbps	30 m
	802.11b	Internet	DDSS	2.4 GHz	11 Mbps	100 m
	802.11g	Internet	OFDM	2.4 GHz	54 Mbps	100 m
Wimax	802.16	MAN	64QAM	2 /11 GHz	70 Mbps	50 Km
UWB	802.15.3a	PAN	M-ary PPM	3.1-10.6Ghz	200 Mbps	10 m
Bluetooth	802.15.1	PAN	AFHSS	2.4 Ghz	1 Mbps	10 m
		Datos			3 Mbps	100 m
ZigBee	802.15.4 ZigBee	PAN	BPSK	2.4 GHz	250 Kbits	10-100 m
		Domótica	QPSK	915 MHz	40 Kbps	10-100 m
				868 MHz	20 Kbps	10-100 m

Tabla 2.2: Tecnologías inalámbricas [20]

Las tecnologías WLAN IEEE 802.11 conocidas comúnmente como WiFi, se han extendido con gran rapidez y son utilizadas en aplicaciones de redes inalámbricas locales. Para solucionar los problemas derivados de la aplicación original, se han incorporado estándares adicionales para mejorar el desempeño de estas redes, lo cual también generó en los últimos años una reducción de costos en los equipos.

El protocolo IEEE 802.11a brinda un gran ancho de banda, posee buena protección contra interferencias, tiene un alcance limitado, el costo es alto y es incompatible con los protocolos IEEE 802.11b y IEEE 802g. El protocolo IEEE 802.11b tiene alcance y velocidad medias, se integra fácilmente con otras redes y soporta gran variedad de servicios, es afectado por interferencias y la configuración es difícil. El protocolo 802.11g tiene un gran ancho de banda y una buena protección contra interferencias, pero puede sufrir interferencias por trabajar en una banda saturada. Actualmente se tiene poca oferta de estos productos en el mercado.

La tecnología WMAN IEEE 802.16 conocida como WIMAX, aparece como una evolución de las redes WLAN hacia mayores coberturas y calidades de servicio. Se tiene un alto costo, por lo que su implementación se ve postergada en economías emergentes y actualmente es utilizada únicamente para el segmento de acceso.

La tecnología de Banda Ultra Ancha (UWB) permite transmitir datos digitales a través de un gran espectro de bandas de frecuencia con un consumo mínimo. Se alcanza velocidades de transmisión muy altas en aplicaciones de redes inalámbricas de área local. Entre las principales características se tienen el consumo mínimo de energía, la alta velocidad de transmisión, el bajo costo y la transmisión de señales a través de obstáculos.

La tecnología inalámbrica Bluetooth está orientado a aplicaciones de voz y datos, permite obviar los cables con un bajo consumo de corriente y posibilita la comunicación activa. La configuración y puesta en marcha es difícil y el costo de los productos con esta tecnología es elevado. [21]

La tecnología ZigBee basada en el estándar IEEE 802.15.4, está orientada al sector del control y la automatización. Fue desarrollado para cubrir las necesidades del mercado de tener un sistema económico, confiable y con un estándar mundial que lo respalde. Esta tecnología permite una comunicación segura para sistemas con bajas tasas de envío de datos y con un consumo reducido de potencia.

2.1.2.3 Sistemas de redes de sensores inalámbricas

La tendencia actual es el uso de comunicaciones inalámbricas donde la alimentación de los equipos es realizada sin cables. Las características comunes a este tipo de comunicación son:

- La alimentación se realiza mediante dispositivos de almacenamiento.
- La red es autoconfigurable.
- El mantenimiento requerido es mínimo.

Las redes de sensores inalámbricas son una aplicación importante para ZigBee y otras tecnologías inalámbricas de corto alcance, debido a que estas redes son ideales para este tipo de comunicación.

Una red de sensores inalámbrica consta de numerosos y económicos sensores inalámbricos capaces de recoger, almacenar y tratar la información del medio ambiente. Esta red permite la comunicación con sus nodos vecinos e incluye aplicaciones de monitoreo. [22]

Con estas redes se realiza el monitoreo de un gran número de condiciones físicas como la temperatura, humedad y presión, las cuales son aplicadas en diversas áreas. Especialmente donde las redes de sensores convencionales son inadecuadas o no están disponibles, como son los terrenos inhóspitos, campos de batalla, en el espacio y en el océano.

Comparado al uso de pocos sensores caros pero altamente efectivos, la estrategia de colocar un gran número de sensores económicos tiene avances significativos. Debido a que son pequeños permiten obtener un menor costo total del sistema, son robustos ante fallas en condiciones de operación distribuida, tienen una muy alta resolución espacial, cobertura uniforme y consumo reducido de energía, todo esto permite que el tiempo de vida del sistema se incremente.

Estas redes se han desarrollado rápidamente y son utilizadas en muchas aplicaciones del sector industrial, doméstico y educacional. Constan de dispositivos de procesamiento y comunicación pequeños y de bajo costo, los cuales son llamados nodos de sensores y son elegidos en función de la potencia que consume, la capacidad de almacenamiento y el poder de procesamiento.

En la tabla 2.3 se muestra la clasificación de las redes de sensores inalámbricas, en función a las principales características como la dependencia de datos, la distribución de los nodos y el esquema de control.

FACTOR	TIPO 1	TIPO 2
Distancia a la estación base o al centro de monitoreo	Salto Simple Transmiten directamente a la estación base.	Salto múltiple Algunos nodos transmiten a la estación vía nodos intermedios.
Dependencia de datos	Agregación Ejecuta funciones para realizar ciertas acciones como eliminar la redundancia	No agregación Los datos son enviados como son.
Distribución de sensores	Determinística La distribución de los sensores es fija o planeada	Dinámica En muchos casos la posición de los sensores no está definida, por lo cual son colocados en distribuciones diversas.
Esquema de control	No autoconfigurable No son capaces de organizarse por sí mismos.	Autoconfigurable Permite autoconfigurarse cuando un nodo falla, consume más energía.
Dominio de aplicación	Variado	Variado

Tabla 2.3: Clasificación de las redes de sensores inalámbricas [23]

Entre los rasgos característicos se tiene la capacidad de organizarse por sí mismos, poseen pequeño rango de comunicación por difusión y ruteo multisalto, permiten una distribución densa y un esfuerzo cooperativo entre los nodos de sensores. Las redes cambian de topología rápidamente ante problemas de desvanecimiento y fallas de los nodos, son limitados en energía, poder de transmisión, memoria y capacidad de procesamiento. [23]

La adición de actuadores abre una nueva dimensión que permitirá la administración y manipulación de los dispositivos, ofreciendo grandes oportunidades para muchas aplicaciones. Se identifica a las redes de sensores inalámbricas como una de las

“10 tecnologías emergentes que cambiarán el mundo”. La combinación de esta tecnología con sistemas microelectromecánicos MEMS y nanotecnología reducirá el tamaño de los nodos y aumentará las capacidades de la red. [24]

Ejemplos de aplicación en ingeniería general son los sistemas telemáticos de los autos, el sensado y automatización en plantas industriales, las oficinas inteligentes, los estudios sociales de la interacción humana, la seguridad doméstica y comercial. En el área de agricultura y monitoreo ambiental se tienen la agricultura de precisión, el monitoreo geofísico, el monitoreo de la calidad del agua natural y la detección de desastres. Adicionalmente se tienen implementadas estas redes en la ingeniería civil para el monitoreo de estructuras, en aplicaciones militares y en la bioingeniería.

2.1.3 Evolución de los sistemas de monitoreo

En el país no se cuenta con soluciones integrales para el monitoreo de parámetros, las mediciones son realizadas por personal de la empresa acuícola que registra la información de los parámetros críticos de manera manual y midiendo cada parámetro por separado. Estas mediciones son sólo indicadores referenciales y es en buena medida una aproximación ya que no se tiene precisión en las mediciones ni en el registro de la información.

A nivel de la región andina se tienen empresas que ofrecen soluciones para satisfacer la necesidad de tener un sistema de monitoreo que asegure una producción óptima de las especies cultivadas. Uno de estos productos se basa en sistemas de adquisición de datos que poseen varios canales disponibles para conectar las señales de diversos sensores, los cuales registran los datos y los transmiten hacia una ubicación remota. Permite adaptarse a los sistemas de comunicación existentes como son las ondas de radio y celular GSM/GPRS, lo cual puede ser configurado por el usuario. El acceso a los datos se realiza mediante un software que permite la lectura y el almacenamiento de estos. [25]

Otro de los productos que se ofrece es el que emplea el sistema SCADA, el cual es un sistema de monitoreo y control que consta de un maestro, uno o más campos de recolección de datos, unidades de control remotos y el software para monitorear y controlar remotamente los elementos de la planta. SCADA está equipado de manera que se puede interconectar para proveer un sistema de monitoreo y control en tiempo real.

2.2 Conceptualizaciones generales

En esta sección se desarrollan los conceptos generales sobre las redes de datos, las topologías y el protocolo inalámbrico ZigBee. Esta información será utilizada en el resto de la investigación.

2.2.1 Redes de datos

Las redes de datos agrupan a dispositivos de comunicación empleando un canal común, se pueden formar estructuras de mayor tamaño mediante la interconexión de estas redes, las cuales son denominadas subredes. Las diferentes formas de conectar estos dispositivos son conocidas como topologías de redes. [26]

2.2.2 Topologías de redes de datos

La topología define la distribución geométrica de las estaciones de una red y los cables que lo conectan, y el trayecto seguido por las señales a través de la conexión física. La topología de la red es la disposición de los diferentes componentes de una red y la forma que adoptará el flujo de la información

Se tienen las topologías físicas anillo, estrella, bus, árbol y malla, y dos topologías lógicas definidas la topología anillo-estrella y bus-estrella. Las topologías lógicas permiten conseguir el funcionamiento de una topología física cableando la red de una forma más eficiente. [27]

2.2.2.1 Topología anillo

En esta topología los nodos de la red se disponen en un anillo cerrado conectados a él mediante enlaces punto a punto entre ellos. Las señales circulan en un solo sentido alrededor del círculo, regenerándose en cada nodo. La desventaja de esta topología es que si se rompe una conexión, la red se cae por completo.

2.2.2.2 Topología estrella

En esta topología todos los nodos de la red se encuentran conectados directamente mediante un enlace punto a punto al nodo central de la red. La desventaja de esta topología es que si el nodo central falla, todo el sistema es afectado.

2.2.2.3 Topología bus

En esta topología los nodos que constituyen la red se disponen linealmente, es decir por medio de un cable que viene a ser el bus de comunicación. Todos los nodos reciben la información que se transmite, un nodo transmite y los demás escuchan. La desventaja de esta topología es que si hay una falla, se detiene el sistema total o parcialmente en función del lugar donde se produce esta.

2.2.2.4 Topología árbol

Es una generalización de la topología bus, el árbol tiene su primer nodo en la raíz y se expande hacia afuera utilizando ramas en donde se conectan los demás nodos, pudiendo tener ramificaciones en cualquier otro punto. Esta topología permite que la red se expanda asegurando que existe sólo una ruta entre dos nodos cualquiera. La desventaja de esta topología se debe a los problemas de atenuación de la señal debido a la distancia recorrida, por ello es necesario el uso de repetidores.

2.2.2.5 Topología malla

En esta topología cada nodo de la red está físicamente conectado a todos los demás nodos de la red. Esto provee un gran nivel de rendimiento y fiabilidad, pero la complejidad y dificultad en la creación de redes se incrementa geométricamente cuando el número de nodos se incrementa.

2.2.2.6 Topología anillo-estrella

En esta topología el cable que une a cada nodo con el siguiente pasa a través de un nodo central que se encarga de desconectarla si sufre avería. De esta manera combina las topologías anillo y estrella resolviendo el problema de la red inoperativa cuando un cable se rompe en la topología anillo.

2.2.2.7 Topología bus-estrella

Es una topología estrella que funciona como si fuera un bus, como punto central tiene un concentrador pasivo hub que implementa internamente el bus, y al que están conectados todos los nodos. La única diferencia que hay entre esta topología mixta y la topología estrella con hub pasivo es el método de acceso al medio.

2.2.3 Protocolo inalámbrico ZigBee

En esta sección se realiza una revisión al protocolo ZigBee, explicando el rol de la Alianza ZigBee, la conexión entre ZigBee y el estándar IEEE 802.15.4, y las cuestiones concernientes a la creación de redes, seguridad y certificación.

2.2.3.1 Alianza ZigBee

Es una asociación de compañías trabajando juntas para desarrollar una red de conexión inalámbrica confiable, rentable y de baja potencia, para el monitoreo y control de productos basados en un estándar abierto a nivel mundial. La Alianza ZigBee también se ocupa de los cambios y las actualizaciones en la documentación ZigBee, conocido como la Especificación ZigBee. [28]

2.2.3.2 IEEE 802.15.4

El estándar IEEE 802.15.4-2003 define el protocolo y la interconexión compatible para dispositivos de comunicación de datos con baja tasa de transmisión de datos, bajo consumo, y baja complejidad para transmisiones de radio frecuencia de corto alcance en una red inalámbrica de área personal (WPAN). En esta revisión se define la capa física (PHY) y la capa de control de acceso al medio (MAC). [29]

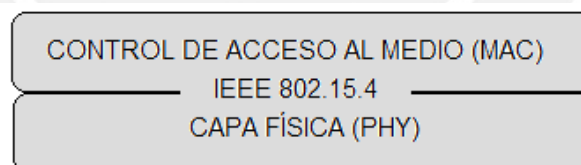


Figura 2.1: Estándar IEEE 802.15.4 [29]

Las características más importantes de este estándar son las siguientes:

- La velocidad de transmisión de datos en el aire alcanza hasta los 250 Kbps, pero debido a la sobrecarga del estándar, la velocidad teórica máxima es de aproximadamente la mitad.
- Tiene la capacidad de formar redes con topología punto a punto y estrella.
- Soporta los modos de direccionamiento de 16 bits o 64 bits.
- Permite la transferencia confiable de datos.
- Posee un indicador de la calidad del enlace inalámbrico.

- El consumo de potencia es reducido.
- La comunicación se realiza sobre 16 canales de 5MHz en la banda de 2450 MHz.

2.2.3.3 ZigBee

Las capas física (PHY) y control de acceso al medio (MAC) del protocolo ZigBee están basadas sobre el estándar IEEE 802.15.4. En la figura 2.2 se muestra la interconexión entre estas capas.

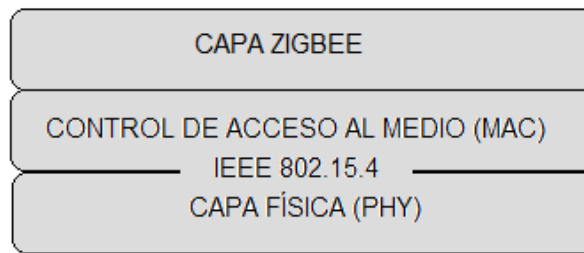


Figura 2.2: Protocolo ZigBee [30]

La capa ZigBee es el nivel donde la diferencia entre ZigBee y el estándar IEEE 802.15.4 se hace visible, debido a que este añade nuevas funcionalidades sobre las capas existentes del estándar IEEE 802.15.4. Las características adicionales más importantes son el soporte de redes con topología malla y el incremento de la seguridad en las comunicaciones. [30]

Una red malla permite la comunicación directa entre todos los nodos, donde cada nodo es capaz de rutear paquetes de datos desde/hacia todos sus nodos vecinos. La red se forma por sí misma, esto significa que cada nodo adicional se une a la red sin necesidad de realizar una configuración manual. La red es auto configurable, ya que ajusta automáticamente las rutas desde/hacia los nodos cuando hay cambios en la red. Estas características hacen a una red malla muy robusta a comparación de una red estrella que depende de un sólo punto de conexión. [31]

Los aspectos sobre seguridad en ZigBee se encuentran definidos en la especificación ZigBee, donde se tienen mecanismos de seguridad sobre tres capas: MAC, Red y Aplicación. Actualmente no se tiene información sobre virus, pero siempre existe el riesgo, especialmente porque esta tecnología será ampliamente usada en el futuro. Finalmente se recomienda el uso de productos certificados para garantizar la interoperabilidad entre dispositivos ZigBee de diferentes fabricantes.

2.3 Solución tecnológica

En esta sección se analiza la importancia del uso de la tecnología en acuicultura, se elige el tipo de comunicación a utilizar y finalmente se presenta el modelo de la solución tecnológica propuesta.

2.3.1 Importancia del uso de la tecnología en acuicultura

La acuicultura está pasando rápidamente de ser una actividad extensiva de baja productividad y de subsistencia, a convertirse en un sector importante de la economía mundial, donde el acceso a la tecnología e información juegan un papel muy importante para su desarrollo. Especialmente las tecnologías de comunicaciones se convierten en una necesidad para todos los acuicultores y de manera especial en los países en vías de desarrollo del tercer mundo.

La utilización e incorporación de estas tecnologías a las actividades productivas importantes y de gran impacto, contribuirán al crecimiento del país y específicamente en la acuicultura impulsarán su desarrollo. De esta manera los acuicultores contarán con recursos tecnológicos que le permitan obtener productos que cumplen con estándares de calidad exigentes para su comercialización en el mercado local y su exportación a mercados internacionales.

El desarrollo de la tecnología está permitiendo al acuicultor realizar ciertas actividades que anteriormente no eran posibles a pesar de su conocimiento, debido a la carencia tecnológica ya que los aportes de la ingeniería en general han estado alejados de esta importante actividad productiva por mucho tiempo.

Con el uso de la tecnología adecuada, el productor es capaz de manejar variaciones rápidas de los parámetros críticos en los tanques de cultivo, los cuales cambian constantemente en condiciones de crianza y reproducción de especies acuícolas. De esta manera se logra maximizar los beneficios, reduciendo los problemas relacionados a enfermedades, producción deficiente, baja tasa de conversión de alimentos y alta tasa de mortalidad.

El costo de la implementación del sistema de monitoreo es un factor importante al momento de determinar la tecnología adecuada a utilizar en el diseño para ajustarse a las condiciones económicas del medio.

2.3.2 Elección del sistema de comunicaciones

Tomando en consideración la información presentada a lo largo del capítulo, se realiza la elección de la comunicación inalámbrica para el sistema de monitoreo. La principal razón de esta elección es para evitar el tedioso proceso del adecuado cableado estructurado que demandan los sistemas cableados.

Realizando un análisis a los sistemas inalámbricos que prescindan del cableado, se concluye que estos poseen sistemas distribuidos potentes, complejos y costosos, los cuales no se ajustan a las necesidades de la planta acuícola. De esta manera surge la necesidad de realizar la búsqueda de dispositivos sencillos, económicos, y con un consumo reducido de energía.

Los fabricantes en los últimos años han venido desarrollando esfuerzos para cubrir esta demanda del mercado, con dispositivos de comunicación de baja frecuencia de transmisión de datos, económicos y con un consumo reducido de potencia. Como resultado se tienen a las redes de sensores inalámbricas que permiten cubrir estos requerimientos, las cuales son una aplicación importante para las tecnologías inalámbricas de corto alcance ideales en este tipo de comunicación.

En este proceso surge ZigBee, que posee un estándar mundial que lo respalda y lo dota de compatibilidad con otros productos. Esto permitirá la integración con otros sistemas de control y automatización, y superar las deficiencias que se presentan en los sistemas distribuidos. Los dispositivos ZigBee permiten adaptarse a muchos microcontroladores de bajo consumo de las familias ATMEL y PIC, disponibles en muchos lenguajes y conocidos por la mayoría de programadores.

ZigBee está orientado a la automatización de casas y edificios, y al control industrial. Ha tomado gran fuerza en los últimos años y permite que la solución del monitoreo de parámetros con este protocolo, brinde un sistema moderno que pueda ser integrado con otros sistemas de mayor orden sin necesidad de hacer grandes cambios a la red instalada y operativa.

La red inalámbrica utilizando el estándar inalámbrico ZigBee, se perfila como la mejor alternativa para mejorar el sistema de monitoreo con el que cuenta la Planta Acuícola PUCP. A continuación se presenta el modelo de la solución tecnológica más adecuada para realizar el diseño de la red inalámbrica.

2.3.3 Modelo de la solución tecnológica

La red inalámbrica propuesta se muestra en la figura 2.3. Aplicada a la acuicultura permitirá la transmisión de información de las condiciones en la unidad de cultivo.

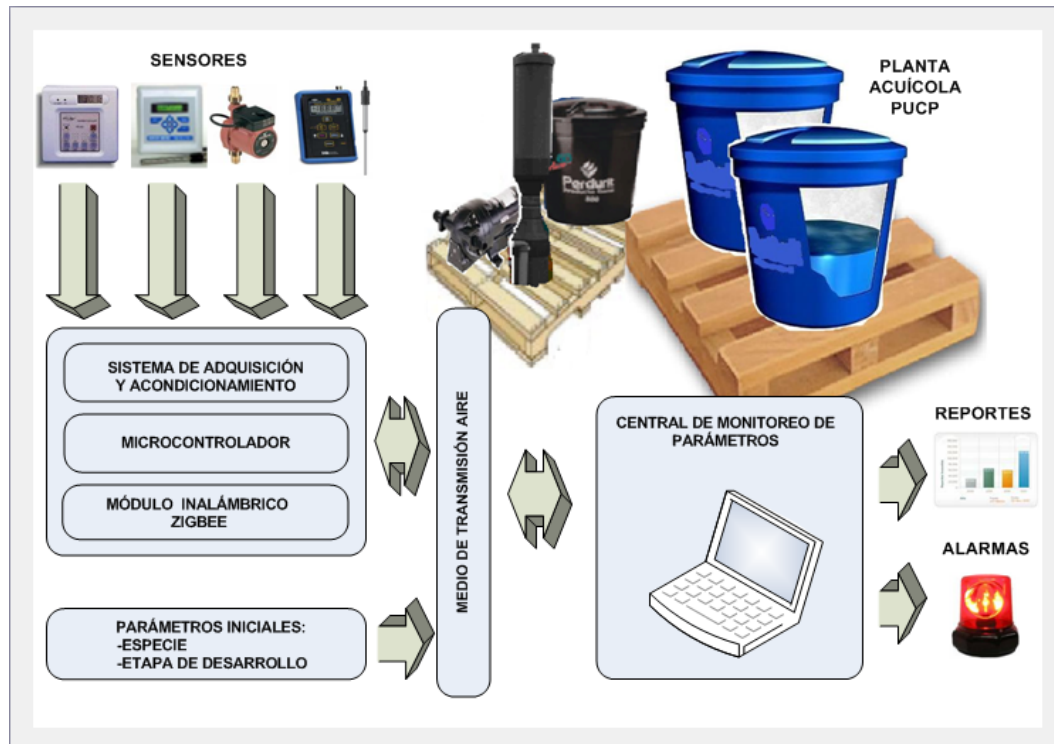


Figura 2.3: Modelo de la solución tecnológica

La información será obtenida mediante una red de sensores, los cuales pueden ser analógicos y/o digitales, estos serán conectados a una tarjeta que contiene una etapa de adquisición y acondicionamiento de la señal, un microcontrolador y un radio transmisor-receptor de radiofrecuencia ZigBee. Esta tarjeta realizará el procesamiento y la transmisión de la información adquirida de manera inalámbrica a una central de monitoreo encargada de coleccionar la información recibida. Adicionalmente se ingresará parámetros de configuración inicial como la etapa de desarrollo y la especie cultivada. La central de monitoreo mostrará la información recibida, generará alertas cuando un parámetro supere los valores permitidos y realizará reportes de la variación en el tiempo de los parámetros críticos evaluados.

Este modelo permitirá realizar el monitoreo de parámetros de la unidad de cultivo, disponiendo de información confiable y relevante que le permitirá al acuicultor el control y administración adecuados, con una mejor toma de decisiones.

CAPITULO 3:
REQUERIMIENTOS PARA EL DISEÑO DE UNA RED INALÁMBRICA
UTILIZANDO TECNOLOGÍA INALÁMBRICA ZIGBEE

En este capítulo se desarrollan los lineamientos generales para realizar el diseño de una red inalámbrica, la cual permitirá la transmisión de la información proveniente de los tanques de cultivo hacia un dispositivo centralizado para su recolección, procesamiento y almacenamiento. Para lograr esto se presentan la hipótesis y los objetivos de la investigación, los cuales permitirán delimitar y orientar el diseño de la red inalámbrica.

Así mismo se realiza una adecuada investigación preliminar que nos permita la identificación del lugar y el entorno de la investigación, terreno, infraestructura, recursos humanos y datos ambientales de la Planta Acuícola PUCP, se realiza también el análisis al proceso de monitoreo utilizado actualmente para identificar los problemas generados con el uso de esta metodología. Todo esto permite determinar las condiciones y requerimientos para el diseño de la red inalámbrica.

3.1 Hipótesis de la investigación

3.1.1. Hipótesis principal

Dado que el monitoreo de parámetros en la Planta Acuícola PUCP es realizado de manera manual y basado en la observación de las condiciones actuales, lo cual genera problemas causados por tener mediciones erróneas o por el olvido de realizarlas.

Entonces un sistema de monitoreo basado en una red de sensores inalámbrica, permitirá disponer de información confiable proveniente de los tanques de cultivo, para el proceso de producción.

3.1.2 Hipótesis secundarias

- 1) El sistema de monitoreo permite la operación continua de medición y registro de datos, mostrando información confiable y rápida en tiempo real.
- 2) El sistema de monitoreo brinda la información necesaria de los parámetros críticos presentes en la unidad de cultivo, para permitir al acuicultor administrar de manera adecuada el proceso de cultivo.

3.2 Objetivos de la investigación

3.2.1 Objetivo general

Diseñar una red inalámbrica utilizando el protocolo de comunicaciones ZigBee para monitorear la calidad del agua en los estanques de crianza de tilapias, de la Planta Acuícola PUCP.

3.2.2 Objetivos específicos

- 1) Automatizar el proceso de medición de parámetros, proporcionando información confiable y rápida de los parámetros críticos mediante el software de monitoreo.
- 2) Realizar el diseño de la red inalámbrica y verificar su funcionamiento mediante circuitos de prueba.

3.3 Universo y muestra

El universo de la investigación está formado por los Centros de cultivo de especies acuícolas, que realizan el monitoreo de la información de los tanques de cultivo de manera manual y basados en la observación de las condiciones actuales. La muestra que se utilizará para la presente investigación será de la Planta Acuícola PUCP ubicado en el campus de la Pontificia Universidad Católica del Perú, que corresponde a una planta piloto de cultivo de Tilapia.

3.4 Situación actual y técnicas de medición de los parámetros críticos

3.4.1 Infraestructura de la Planta Acuícola PUCP

La Planta Acuícola PUCP cuenta con un área aproximada de 40 m² y tiene las siguientes características: construcción recubierta por un material plástico, que permite mantener una temperatura mayor a la exterior, el material del suelo es tierra, la temperatura máxima aproximada es de 40° en el verano y la mínima es de 20° en el invierno, la humedad relativa alcanzada en el invierno es cercana al 90 %.

En la figura 3.1 se muestra la infraestructura de la planta, la cual cuenta con dos tanques de cultivo de 1100 litros cada uno, un tanque de compensación de 600 litros, un biofiltro tipo Venturi, una bomba de agua y una bomba aireadora. En la planta se cuenta con energía eléctrica y red de agua potable.



Figura 3.1: Planta Piloto PUCP [32]

3.4.2 Técnicas de medición de los parámetros críticos

Para comenzar y definir de manera adecuada los requerimientos y necesidades de información por parte de los usuarios en acuicultura, es necesario mencionar que se realizó un análisis del proceso de producción, en base a la experiencia obtenida con el cultivo de Tilapia realizado durante los meses de Julio a Diciembre del año 2007 en la Planta Acuícola PUCP.

En este período se realizó la construcción de la planta, y se inició con el cultivo de Tilapia en la etapa de engorde. El método artesanal fue utilizado para realizar la medición periódica de la temperatura, el PH, nitritos, nitratos, oxígeno disuelto, amonio y amoníaco.

Esta experiencia permitió conocer ampliamente el proceso de medición de parámetros (ver figura 3.2), a fin de determinar los problemas generados con la utilización del método artesanal.

El proceso consiste en verificar si el instrumento se encuentra calibrado, luego se realiza la medición validando los valores obtenidos, se registra la información y se genera alertas cuando un parámetro excede los valores permitidos. Esto se repite para cada parámetro crítico y para los dos tanques que posee la planta acuícola.

Entre los problemas identificados se tiene la necesidad de contar con personal permanente y calificado, las mediciones son deficientes debido al uso de instrumentos de medición inadecuados, el análisis es realizado en base a la experiencia del personal a cargo y el tiempo necesario para realizar las mediciones se vuelve considerable cuando el número de tanques se incrementa.

Las diversas reuniones sostenidas con el Dr. Manuel Segovia Quintero del Departamento de Acuicultura del Cicese de Mexico, especialista en el manejo de sistemas de recirculación, permitieron conocer las necesidades de los usuarios demandantes de tecnología acuícola en la actualidad.

Con la experiencia obtenida y la información brindada por el Dr. Manuel Segovia, finalmente se identificó las necesidades durante el cultivo de especies acuícolas, y se determinó los requerimientos y las especificaciones que debe poseer la red inalámbrica a diseñar.

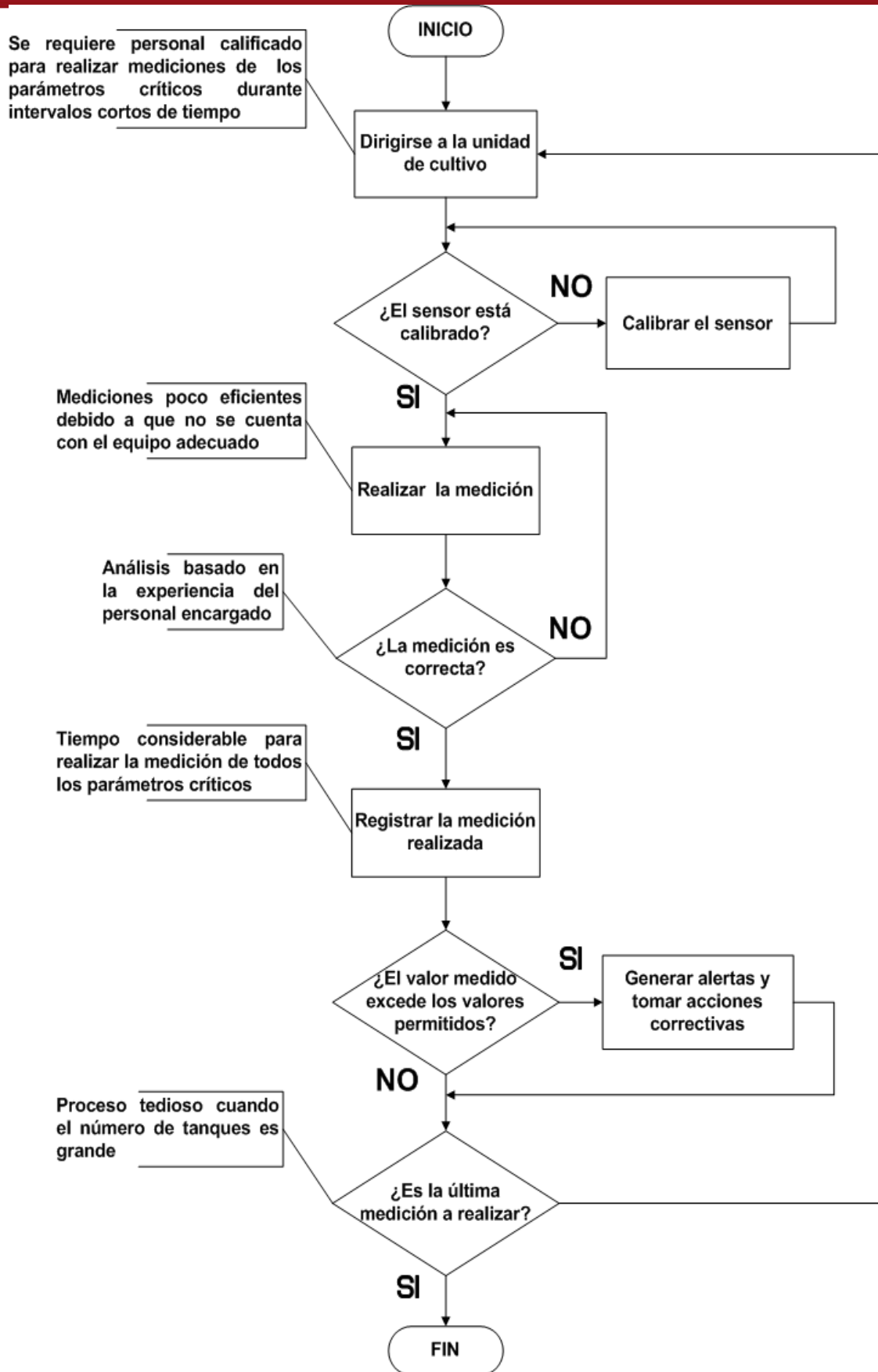


Figura 3.2: Medición de parámetros en la Planta Acuícola PUCP

3.5 Requerimientos de Diseño

La demanda de tecnología para el control y monitoreo en acuicultura es cada vez mayor debido al creciente desarrollo de esta actividad a nivel mundial y local. Por este motivo es necesario realizar el diseño de una red inalámbrica que cubra las necesidades de información generadas en la acuicultura, permitiendo un sistema sencillo, confiable, de bajo costo y bajo consumo.

El diseño debe coleccionar la información proveniente de los diferentes sensores instalados en el sistema de recirculación de la Planta Acuícola PUCP. Esto será posible gracias a unos nodos remotos que tendrán la capacidad de sensar, procesar y transmitir la información de manera inalámbrica hacia un dispositivo centralizado.

El dispositivo centralizado ubicado en la Planta Acuícola PUCP tendrá la capacidad de coleccionar la información, procesar los datos recibidos, mostrar información relevante, generar alertas, realizar tareas en base a los datos recibidos y retransmitir la información hacia una ubicación remota de manera inalámbrica.

Para realizar el diseño de una red inalámbrica que cumpla con los objetivos descritos, y tomando en consideración el análisis presentado, se concluye que esta debe cumplir con los requerimientos y las especificaciones siguientes:

- Realizar la medición de al menos los siguientes parámetros críticos: la temperatura, el pH, el oxígeno disuelto y las concentraciones de CO₂; los cuales afectan directamente a la calidad del agua de la unidad de cultivo.
- La cobertura de la red inalámbrica debe ser como mínimo 60 m².
- La comunicación debe ser realizada de manera inalámbrica.
- Los nodos deben ser pequeños, simples, de bajo costo y con un consumo reducido de potencia.
- Los nodos remotos deben ser capaces de operar de manera autosostenida.
- Los datos obtenidos deben ser confiables.

- La información proveniente de los diferentes sensores, debe estar disponible en todo momento para su procesamiento y almacenamiento.
- La interfaz para mostrar la información debe ser simple y adecuada.
- La instalación, configuración y mantenimiento de la red será sencillo.
- El sistema debe generar alertas ante variaciones de los parámetros críticos que afectan a la producción y reproducción de especies acuícolas.
- El sistema será resistente a las condiciones de humedad y temperatura presentes en el invernadero del Grupo de Apoyo al Sector Rural, donde opera la Planta Acuícola PUCP.



CAPÍTULO 4: DISEÑO DE UNA RED UTILIZANDO ZIGBEE PARA EL SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE LA PLANTA ACUÍCOLA PUCP

En este capítulo se describe el procedimiento seguido para realizar el diseño de una red inalámbrica, la cual permitirá transmitir información proveniente de los tanques de la unidad de cultivo hacia un dispositivo centralizado y retransmitirla hacia una ubicación remota.

El proceso de diseño involucra la selección de los sistemas de adquisición y digitalización, los equipos y componentes para la transmisión de datos, procesamiento de datos y el almacenamiento de la información proveniente de la planta acuícola.

En este proceso se realiza el diagrama de la red, se define la topología a utilizar para el flujo de la información y la lógica que siguen los datos durante la transmisión, lo cual permitirá interpretar y utilizar adecuadamente la información recibida.

Se realiza el diseño en base a los requerimientos y las características que debe tener una red inalámbrica para el monitoreo de parámetros, la descripción del sistema y el entorno donde operará la red. Luego se presenta el diseño de la red inalámbrica y se construyen los circuitos necesarios para realizar las pruebas de campo que permiten validar el diseño propuesto y finalmente se presentan los costos derivados de esta investigación.

4.1 Análisis y selección del hardware

Como primer paso se analizan los elementos principales que componen la red inalámbrica a diseñar, estos son el microcontrolador y el módulo transmisor-receptor de radiofrecuencia.

4.1.1 Microcontrolador

Se determina la utilización de un microcontrolador externo al módulo transmisor-receptor de radiofrecuencia para cumplir con los requerimientos establecidos. El microcontrolador a seleccionar debe ser capaz de manejar señales analógicas y digitales, y tener un consumo reducido de corriente por ciclo de reloj para estar de acuerdo con lo que establece el estándar ZigBee. Este debe ser capaz de soportar comunicación ISP para permitir la programación en el sistema instalado, contar con temporizadores, contadores y comunicación serial vía UART para su integración con el módulo transmisor-receptor de radiofrecuencia.

Teniendo en cuenta estos requerimientos se elige el microcontrolador ATmega8 del fabricante ATMEL, las principales razones de esta elección son las siguientes:

- El microcontrolador es capaz de soportar comunicación ISP, cuenta con tres temporizadores/contadores, tres canales PWM, seis canales ADC y un USART.
- El consumo de corriente es de 3.6 mA cuando se encuentra activo.
- El funcionamiento del ATmega8 es conocido, ya que los fundamentos de su operación son adquiridos en las aulas y el Laboratorio de Microprocesadores de la PUCP, donde se realizan muchos proyectos utilizando este microcontrolador.

4.1.2 Módulo transmisor-receptor ZigBee

Es el componente principal de la red inalámbrica, encargado de la transmisión y recepción de datos utilizando el protocolo ZigBee. Su operación consistirá básicamente en la transmisión vía radiofrecuencia de los datos enviados por el microcontrolador mediante el puerto UART.

Para seleccionar el hardware del módulo transmisor-receptor ZigBee, se realiza un análisis al mercado de fabricantes de dispositivos ZigBee, comparando los diferentes productos y chips disponibles actualmente.

4.1.2.1 Consideraciones

El análisis al mercado de fabricantes está enfocado en analizar los siguientes aspectos generales de los diferentes dispositivos ZigBee:

- La versión ZigBee que utilizan.
- El soporte de redes con topología malla.
- Las bandas de frecuencias que soportan.
- El tipo de chip utilizado.
- El precio del chip/módulo.
- La sensibilidad del receptor.
- La máxima potencia de transmisión.

Adicionalmente se tiene que considerar la facilidad para conseguir el módulo, si hay un representante del fabricante en el país o si es necesaria la importación del producto, esto influye en el tiempo de desarrollo de la investigación.

4.1.2.2 Tabla de fabricantes

En la tabla 4.1 se muestra un resumen de los principales fabricantes y los productos que ofrecen. Se realiza la comparación teniendo en cuenta las consideraciones más importantes a tomar en cuenta para la elección de un producto/chip ZigBee.

Fabricante	Producto	Versión ZigBee	Sensibilidad del receptor	Poder de Transmisión	Precio
PRODUCTOS					
Integration UK	IA OEM DAMD1	2006	-90dBm	0 dBm	\$49.00
Maxstream	XBe/XBee-PRO	2004	-100dBm (PRO)	+18dbm (PRO)	\$19.00
CHIPS					
TI	CC2420	2006	-95dBm	0 dBm	\$ 6.60
Freescale	MC1319x	2004	-92dBm	+3dbm	\$ 3.98
Microchip	MRF24J40	2004	-91dBm	+3dBm	\$ 5.38
Ember	EM250/260	2004	-98dBm	+3dBm	\$ 7.41
Jennic	JN513x	2004	-97dBm	+3dBm	\$22.35

Tabla 4.1: Fabricantes de dispositivos ZigBee (Precios en dólares) [33]

El análisis muestra que hay algunas características que son comunes a todos los productos y chips considerados. Estas son el soporte de redes con topología malla y la utilización de la banda de 2.4 GHz para realizar la comunicación inalámbrica.

Las diferencias entre los chips y productos ofrecidos se centran en aspectos como la versión ZigBee que utilizan 2004 ó 2006, el rango de precios varía desde \$3.98 hasta \$49.00, la sensibilidad del receptor se encuentra en el rango de -90 dBm a -100 dBm y la máxima potencia de transmisión varía desde 0dBm hasta +18dBm.

4.1.2.3 Elección del módulo transmisor-receptor ZigBee

Teniendo en cuenta las consideraciones mencionadas y el análisis realizado, los productos ZigBee que ofrece el fabricante MaxStream llamados XBee/XBee-Pro son seleccionados como el hardware que será utilizado en la ejecución de la investigación. Las principales razones para la elección de estos productos son:

- Los módulos XBee trabajan en modo API y en modo transparente (UART).
- Tienen un precio adecuado.
- Brindan buen rendimiento inalámbrico.
- Se cuenta con el Kit de desarrollo ZigBee del fabricante MaxStream y varios módulos XBee/XBee-Pro, de propiedad de la PUCP.

4.2 Entorno de trabajo

Luego de haber seleccionado los elementos principales de la red inalámbrica, se presentan los componentes tanto de hardware como de software necesarios para lograr el despliegue y operación de la red. Estos formarán el entorno de trabajo dentro de la Planta Acuícola PUCP.

De esta manera se busca cumplir con los objetivos descritos y demostrar la validez de la hipótesis presentada. A continuación se describen las principales características, el funcionamiento y el modo de operación de estos elementos.

4.2.1 Hardware para el diseño de la red inalámbrica

Para la operación de la red inalámbrica en la Planta Acuícola PUCP, se requiere contar con los siguientes elementos:

- Una computadora personal con sistema operativo Windows XP, memoria RAM de 512 MB, procesador Intel de 2.4 GHZ y disco duro de 40 Gbytes.
- Sensores de temperatura, oxígeno disuelto, concentraciones de CO₂ y pH.
- Una tarjeta de desarrollo USB XBee/XBee-Pro RF OEM.
- Módulos XBee/XBee-Pro.
- Microcontroladores ATmega8.

4.2.1.1 Módulo XBee/XBee-Pro

En la forma más simple de operación, este módulo junto a otro módulo, funciona como un reemplazo de cable (modo transparente) para la comunicación serial (UART). Si este enfoque simple es demasiado limitado para la aplicación, también es posible utilizar el modo API para crear una red malla de hasta 46 656 nodos.

Los módulos XBee vienen en dos tipos XBee y XBee-Pro. En la tabla 4.2 se muestran las principales diferencias que existen entre estos.

Especificación	XBee	XBee-Pro
Rango urbano	30 m	100m
Rango línea de vista	100m	1500m
Poder de transmisión salida	1 mW (0 dBm)	60 mW (18 dBm)
Tasa de transferencia	250,000 bps	250,000 bps
Fuente de poder	2.8 – 3.4 V	2.8 - 3.4 V
Sensibilidad del receptor	- 92 dBm	- 100 dBm
Corriente de transmisión	45mA @ 3.3 V	137mA @ 3.3 V
Corriente de recepción	50mA @ 3.3 V	55mA @.3 V
Banda de frecuencia de operación	ISM 2.4 GHz	ISM 2.4 GHz

Tabla 4.2: Características del módulo XBee/ XBee-Pro OEM RF [34]

Los requerimientos establecen que el sistema deberá funcionar en un entorno que puede variar desde 20°C hasta 40°C. En las especificaciones técnicas se indica que los módulos XBee operan apropiadamente en el rango industrial que abarca desde -40°C hasta 85°C, por debajo y por encima de los requerimientos establecidos.

En el desarrollo de la investigación se utilizan ambos módulos. Los módulos XBee son utilizados para la comunicación dentro del área del invernadero donde opera la

planta, debido a que no se requiere cubrir una gran distancia entre los nodos. Los módulos XBee-Pro cubren una mayor distancia y son utilizados para realizar la comunicación entre la planta acuícola y la Estación Base ubicada en el Pabellón V.

En la figura 4.1 se muestran los módulos XBee y los diferentes tipos de antena con los que se cuenta, la antena dipolo, chip y omnidireccional que se conecta mediante un conector U.FL.

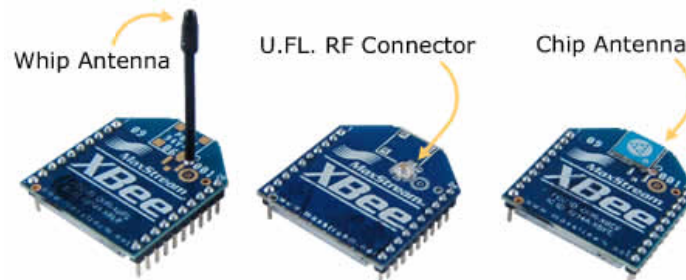


Figura 4.1: Módulos XBee/XBee-Pro [34]

4.2.1.2 Tarjeta de desarrollo XBee

Para la interfaz del módulo XBee/XBee-Pro se utilizará una tarjeta de desarrollo. Cuando el módulo es colocado sobre la tarjeta de desarrollo, se habilita un camino sencillo de comunicación, dotándolo de conectividad a través del puerto USB ó RS-232. En la figura 4.2 se muestran ambas versiones de la tarjeta de desarrollo.



Figura 4.2: Tarjeta de desarrollo XBee USB (izquierda) y RS-232 (derecha) [34]

4.2.2 Software para el diseño de la red inalámbrica

En esta sección se cubre el software utilizado y desarrollado en la investigación. Se realiza una descripción de las herramientas de desarrollo y una introducción a los

conceptos básicos de la lógica del módulo XBee, abarcando aspectos concernientes al direccionamiento, *firmware*, modos de operación y el contexto para su configuración, los cuales son la base de la operación bajo el protocolo ZigBee.

4.2.2.1 Software para el monitoreo de la red inalámbrica

El software de monitoreo fue desarrollado utilizando el programa Visual Basic 6.0., el cual permite un entorno gráfico de programación, ya que cuenta con editor de código, depurador de código, compilador y constructor de interfaz gráfica.

En la figura 4.3 se muestra el software AQUAPUCP v1.0, el cual opera bajo el S.O. Windows XP y permite la interfaz visual para el monitoreo parámetros brindando al usuario una aplicación sencilla y amigable.

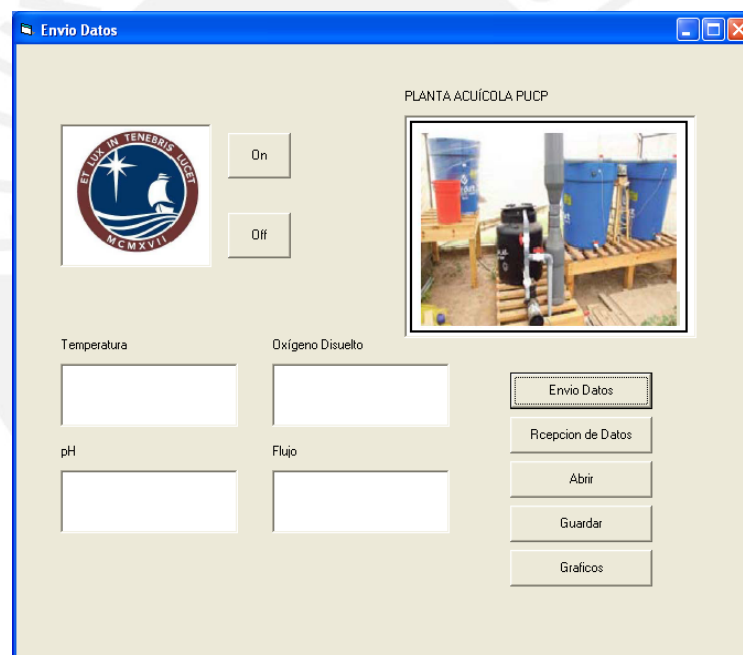


Figura 4.3: Software de monitoreo AQUAPUCP v1.0

Este software permite la recepción/transmisión de datos desde/hacia la Planta Acuícola PUCP, realizando el monitoreo constante de los parámetros críticos y mostrando los valores adquiridos en tiempo real. Adicionalmente se tienen opciones para el envío de comandos de configuración hacia los nodos remotos, guardar los datos recibidos en un archivo, abrir los datos almacenados en la memoria y la posibilidad de realizar gráficos de la evolución de un determinado parámetro crítico en función del tiempo.

4.2.2.2 Software para la configuración y el mantenimiento de la red

X-CTU es una aplicación provista por Maxstream, diseñado para interactuar con los archivos del *firmware* que se encuentran sobre los productos RF de MaxStream y proveer a los usuarios una interfaz gráfica simple de usar.

X-CTU opera bajo Windows, y se encuentra disponible para ser descargado de manera gratuita en la página web del fabricante. En la figura 4.4 se muestra la versión 5.0.0.2 de este software, la cual fue utilizada para realizar la configuración y el mantenimiento de la red, tanto de los nodos remotos, el nodo coordinador y la estación base. Esta versión permite hacer pruebas de la red, configurar los módems y visualizar la transferencia de datos.

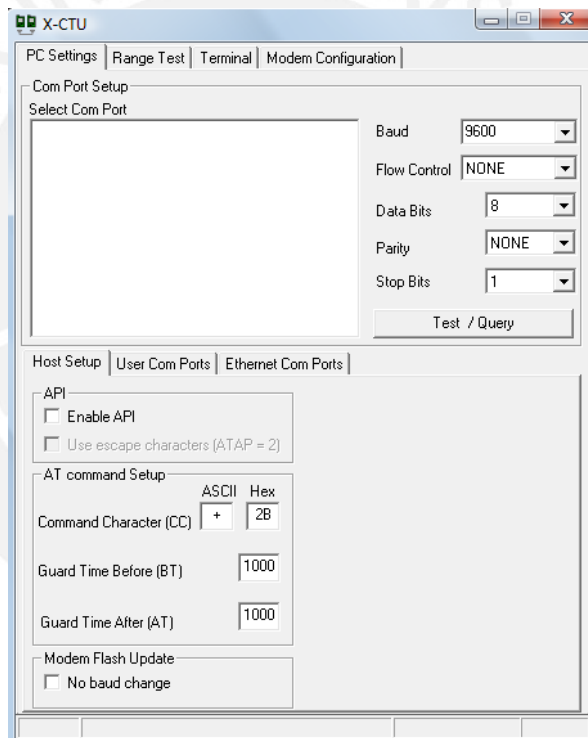


Figura 4.4: X-CTU [34]

4.2.2.3 Software del nodo remoto y el nodo coordinador

Para desarrollar las aplicaciones que permitan habilitar la comunicación entre los componentes de la red inalámbrica cumpliendo con el protocolo ZigBee se utiliza el software VMLAB. El cual permite realizar la programación de los microcontroladores de la familia ATMEL y la simulación/depuración de los programas desarrollados.

La programación es realizada en un lenguaje de alto nivel debido a lo complicado de programar en lenguaje ensamblador, para ello se requiere tener instalado el programa WinAVR basado en el compilador GNU GCC, que permite integrar el compilador de lenguaje C y VMLAB.

4.2.2.4 Operación del módulo XBee/XBee-Pro

Se describen algunos aspectos básicos del funcionamiento de los módulos XBee, los cuales gobiernan su operación y corresponden a la especificación ZigBee. Estos conceptos son necesarios para comprender el resto de la investigación.

4.2.2.4.1 Direccionamiento

Se tienen dos formas de direccionamiento de los módulos XBee/XBee-Pro, los cuales corresponden con la especificación ZigBee 2006:

- **Direccionamiento de 16 bits**, una dirección de red de 16 bits es asignada a un nodo cuando este se une a la red. La dirección de red es única para cada nodo en la red, esta no es estática y puede ser reconfigurada por software.

El direccionamiento de 16-bits simplifica la comunicación con una dirección corta, pero introduce el riesgo del incremento de colisiones si una dirección particular es asignada a múltiples nodos dentro de la misma red.

- **Direccionamiento de 64 bits**, cada nodo contiene una única dirección de 64 bits que lo identifica. Esta dirección corresponde al número serial asignado de fábrica, la cual es permanente y no puede ser cambiada.

Al utilizar este tipo de direccionamiento no se tienen problemas de colisiones, pero se incrementa el costo en la comunicación al tener una dirección extensa.

4.2.2.4.2 Firmware XBee

El *firmware* es un bloque de instrucciones embebidos en un dispositivo físico que establece la lógica de su funcionamiento. Los módulos XBee/XBee-Pro pueden ser utilizados con dos tipos principales de *firmware*, el *firmware* basado en el estándar IEEE 802.15.4 ó el *firmware* ZigBee.

El *firmware* 802.15.4 hace que el módulo opere como un dispositivo del estándar IEEE 802.15.4. Con esto el módulo es capaz de soportar redes con topología punto a punto y estrella, como es especificado en este estándar.

El *firmware* ZigBee permite operar al módulo como un dispositivo ZigBee. Con este *firmware* el módulo soporta redes con topología malla y las topologías del estándar IEEE 802.15.4.

4.2.2.4.3 Comunicación Serial

Los módulos XBee/Xbee-Pro poseen una interfaz para comunicarse con otros dispositivos a través de una lógica a nivel asíncrono por el puerto serial. A través de este puerto serial, el módulo puede comunicarse con alguna lógica y voltaje compatible UART o mediante un traductor de nivel para cualquier dispositivo serial.

1) Flujo de datos UART

Los dispositivos que tienen una interfaz UART pueden ser conectados directamente a los pines del módulo RF como se muestra en la figura:

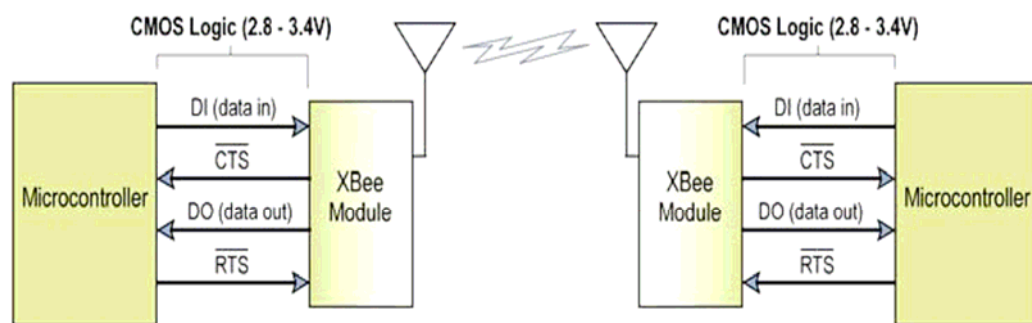


Figura 4.5: Control de Flujo de datos en un entorno con interfaz UART [34]

Los datos entran al módulo por el UART a través del pin DI (pin 3) como una señal serial asíncrona. La señal se encuentra en nivel alto cuando no se están transmitiendo datos. Cada byte de datos consiste de un bit de inicio (nivel bajo), 8 bits de datos (el LSB primero) y un bit de parada (nivel alto).

En la figura 4.6 se ilustra el patrón de bits serial de datos pasando a través del módulo y siendo transmitidos por radiofrecuencia.

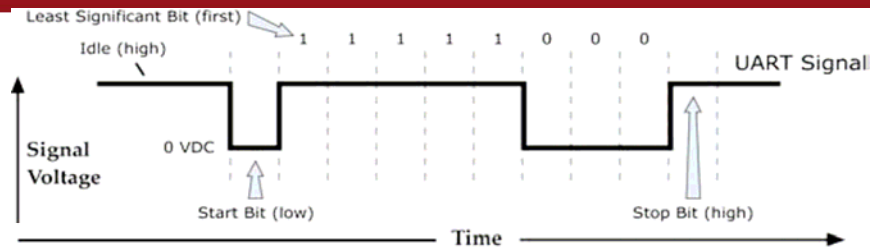


Figura 4.6: Paquete 0x1F (número 31 decimal) [34]

El módulo UART realiza tareas como la temporización y el chequeo de paridad, que son necesarias para las comunicaciones de datos. Para lograr una comunicación serial adecuada es importante realizar la configuración de los dos puertos UART's con parámetros compatibles (velocidad en baudios, paridad, número de bits de inicio, bits de parada y bits de datos).

2) Operación transparente

Por defecto los módulos XBee operan en modo transparente. Cuando trabajan en este modo, los módulos son configurados usando comandos AT y la operación API no es soportada. Los módulos actúan como una línea de reemplazo serial, todos los datos recibidos por el pin de entrada serial son direccionados para la transmisión RF y cuando se reciben datos RF, estos son enviados al pin de recepción serial.

3) Operación API

La operación API (Interfaz de Programación de Aplicaciones) es una alternativa a la operación transparente por defecto. La trama basada en API extiende el nivel al cual una aplicación puede interactuar con las capacidades de red del módulo.

Cuando trabajamos en modo API todos los datos de entrada y salida están contenidos en tramas que definen operaciones o eventos con el módulo. Las tramas de datos transmitidas incluyen la trama de datos a transmitir y la trama de comandos. Las tramas de datos recibidas incluyen la trama de datos RF recibida, los comandos de respuesta y las notificaciones de eventos.

La operación API facilita muchas operaciones como la transmisión de datos a múltiples destinatarios sin entrar al modo comandos, recibir el estado de cada paquete transmitido e identificar la dirección fuente de cada paquete recibido.

Cuando usamos el modo API, la comunicación con el XBee es más eficiente, pero se incrementa la complejidad al momento de operar la red. El formato de la trama es mostrada en la figura 4.7, consta de las siguientes partes, delimitador de inicio, longitud de la trama de datos, trama de datos, y finalmente una comprobación. Esta trama es enviada byte por byte, a través del puerto UART.



MSB = Most Significant Byte, LSB = Least Significant Byte

Figura 4.7: Estructura de la trama de datos [34]

4.2.2.4.4 Indicador de Potencia de la Señal Recibida (RSSI)

El Indicador de Potencia de la Señal Recibida es un valor que indica que tan fuerte es la señal inalámbrica. Es un valor logarítmico en el rango de 0dBm a -100dBm, pero sólo se toma el promedio entre -40dBm y la sensibilidad del módulo receptor.

4.3 Desarrollo de la solución

Se realiza el diseño del sistema de monitoreo utilizando tecnología inalámbrica ZigBee, el cual reemplazará al sistema con el que se cuenta actualmente.

4.3.1 Descripción del Sistema

Teniendo en cuenta las consideraciones y especificaciones presentadas en el capítulo anterior, y con las precisiones analizadas durante la selección del hardware y software, se presenta el sistema de monitoreo de parámetros en la figura 4.8.

Este sistema consta de un dispositivo centralizado (el nodo coordinador), numerosos nodos remotos y la estación base. Los nodos remotos adquieren la información de la planta mediante los sensores instalados en los tanques de cultivo y la transmiten hacia el nodo coordinador, el cual colecta la información recibida, la muestra en el módulo de monitoreo y la retransmite hacia la estación base. Los nodos remotos y el nodo coordinador se encuentran ubicados dentro de la Planta Acuícola PUCP, mientras que la estación base se encuentra en el pabellón V.

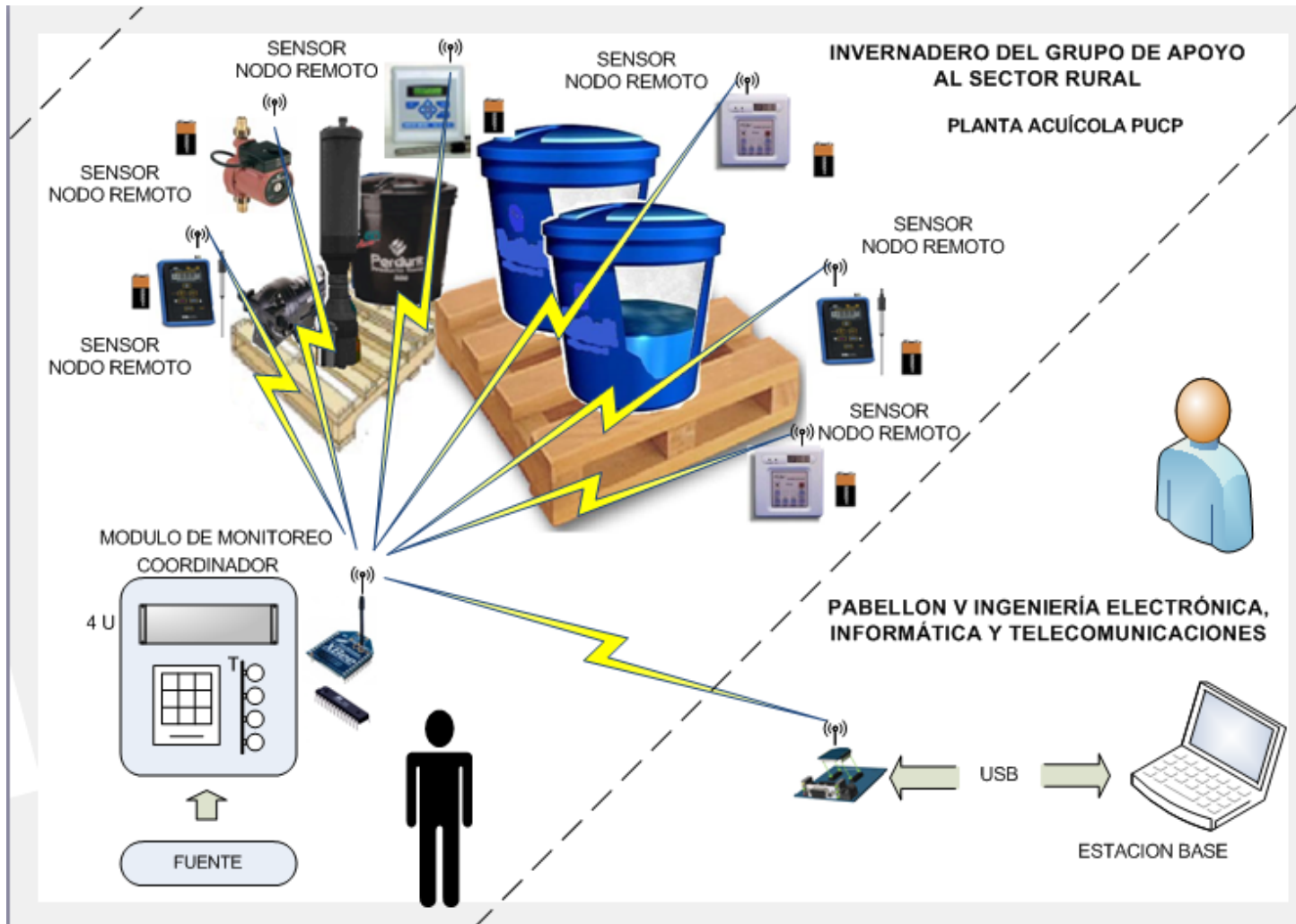


Figura 4.8: Esquema general de la red de sensores inalámbrica

El nodo coordinador es el encargado de coleccionar la información proveniente de los diferentes nodos remotos, actuando como una puerta de enlace entre estos y la estación base hacia donde retransmite la información recibida. Este nodo cuenta con capacidades de procesamiento y almacenamiento de la información recibida para la administración de la red inalámbrica. El coordinador se encuentra en una ubicación central de la planta acuícola y cuenta con una interfaz visual donde se muestran las mediciones realizadas mediante un menú de selección.

Los nodos remotos (configurados como dispositivos terminales), tienen la función de adquirir la información de los diferentes parámetros críticos provenientes de los tanques de cultivo y transmitirla vía radiofrecuencia hacia el nodo coordinador. Pueden realizar esto de manera autónoma o bajo una solicitud específica del usuario. Para lograr esto el nodo remoto consta de un sensor, una unidad de adquisición y acondicionamiento, un microcontrolador para el procesamiento y creación de la trama de datos a transmitir y un radio transmisor-receptor RF.

La estación base es la encargada de recibir la información proveniente de la planta acuícola y almacenarla en la memoria. Permite mostrar la información procesada en una interfaz visual de monitoreo y realizar el envío de comandos de configuración y solicitudes de acceso a información específica de los tanques de cultivo.

Toda la comunicación es realizada de manera inalámbrica, modulando entre sí una portadora de 2.4 GHz, utilizando la técnica de modulación DDSS y con una tasa de transmisión que alcanza hasta los 250 Kbps, correspondiente al estándar ZigBee.

4.3.2 Arquitectura de la red

En esta sección se muestra la arquitectura de todos los elementos que componen la red inalámbrica, los cuales cumplen con los requerimientos descritos y contribuyen a lograr la solución propuesta. Luego se presentan los circuitos esquemáticos desarrollados en base a la arquitectura descrita para cada elemento.

Los elementos de la red inalámbrica son diseñados de tal manera que cumplen con las restricciones de hardware y software para garantizar una comunicación eficiente, tales como poder de procesamiento adecuado, uso de recursos de memoria mínimos y maximización del tiempo de vida de la batería. El software considera el tiempo de respuesta, el rendimiento de la red y la operación autónoma.

4.3.2.1 Arquitectura del nodo remoto

Los nodos remotos permiten la adquisición, procesamiento y transmisión vía radiofrecuencia de los parámetros críticos evaluados a una ubicación remota. Estos son configurados como dispositivos terminales, no tienen capacidad de rutear paquetes y siempre deben interactuar con su nodo padre router o coordinador en orden para transmitir o recibir datos.

Un dispositivo terminal puede ser una fuente o destino de paquetes de datos, pero no puede enrutar paquetes, se alimenta mediante baterías y permite operar con un consumo reducido de potencia. Los intervalos de tiempo entre mediciones se establecen y configuran antes del inicio de operación de la red y pueden ser modificados desde la estación base de manera inalámbrica mediante el envío de comandos de configuración.

En la figura 4.9 se muestra la arquitectura de un nodo remoto, el cual consta de un sensor, la fuente de alimentación, el módulo transmisor-receptor de radiofrecuencia, el microcontrolador y los periféricos de entrada/salida.

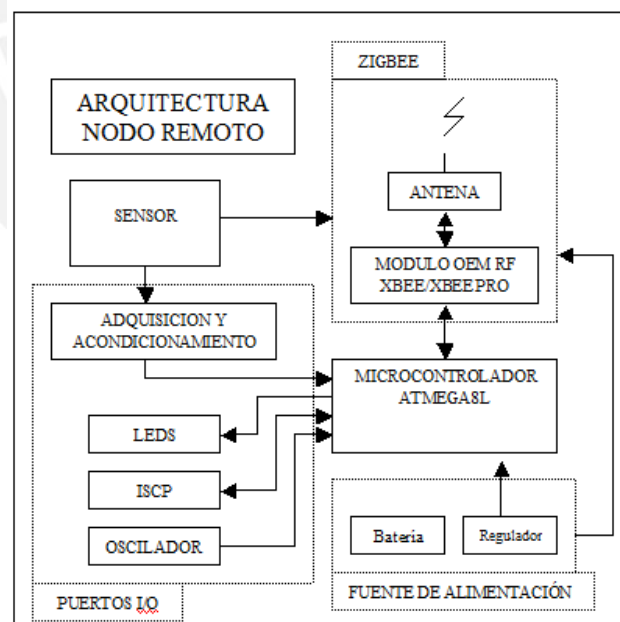


Figura 4.9: Arquitectura del nodo remoto

Es posible realizar la conexión de sensores analógicos y/o digitales a cada nodo remoto, los cuales pueden ir conectados al microcontrolador y/o directamente al

módulo transmisor-receptor de RF. De esta manera es viable la conexión de más de un sensor a cada nodo remoto, con lo que se logra incrementar la capacidad de transmisión de parámetros críticos, asegurando la escalabilidad de la red. Se detallan las principales características de esta arquitectura:

- A. Fuente de alimentación: El nodo remoto se alimenta mediante una batería de 9V, seleccionada para garantizar estabilidad y larga duración. Se cuenta con reguladores de 5 y 3.3 V para alimentar al microcontrolador y al radio ZigBee.
- B. Microcontrolador: Es el elemento principal del nodo remoto, encargado de la creación de la trama ZigBee a transmitir, y de controlar el flujo de la información a través de los diferentes elementos del nodo.
- C. Radio-Transmisor: Realiza la transmisión y recepción de datos vía radiofrecuencia utilizando el protocolo ZigBee. Para la comunicación inalámbrica y la unión a la red del nodo remoto se utiliza el módulo XBee.
- D. Sensor: Los sensores permiten adquirir información sobre el proceso de cultivo, los cuales responden ante un cambio en las condiciones de los parámetros medidos produciendo una respuesta eléctrica. Se cuenta con sensores analógicos y digitales adecuados para medir cada parámetro crítico de la planta.
- E. Puertos I/O: Los puertos de entrada/salida permiten interactuar con el nodo remoto, mediante estos se realiza la programación ISP (Programación en sistema instalado), la adquisición y el acondicionamiento de la señal proveniente de los sensores y la conexión de leds indicadores de eventos.
- F. Software: Se desarrolla el software adecuado para controlar al nodo remoto, el cual permite transmitir, procesar, almacenar y rutear la información.
- G. Hardware: El hardware es seleccionado para cumplir con los requerimientos de tamaño y capacidad adecuados, con un encapsulado que permite soportar las condiciones adversas presentes dentro de la planta acuícola.

En la figura 4.10 se muestra el circuito esquemático del nodo remoto, desarrollado en base a la arquitectura descrita y teniendo en consideración los aspectos necesarios para garantizar una operación sin inconvenientes de la red inalámbrica.

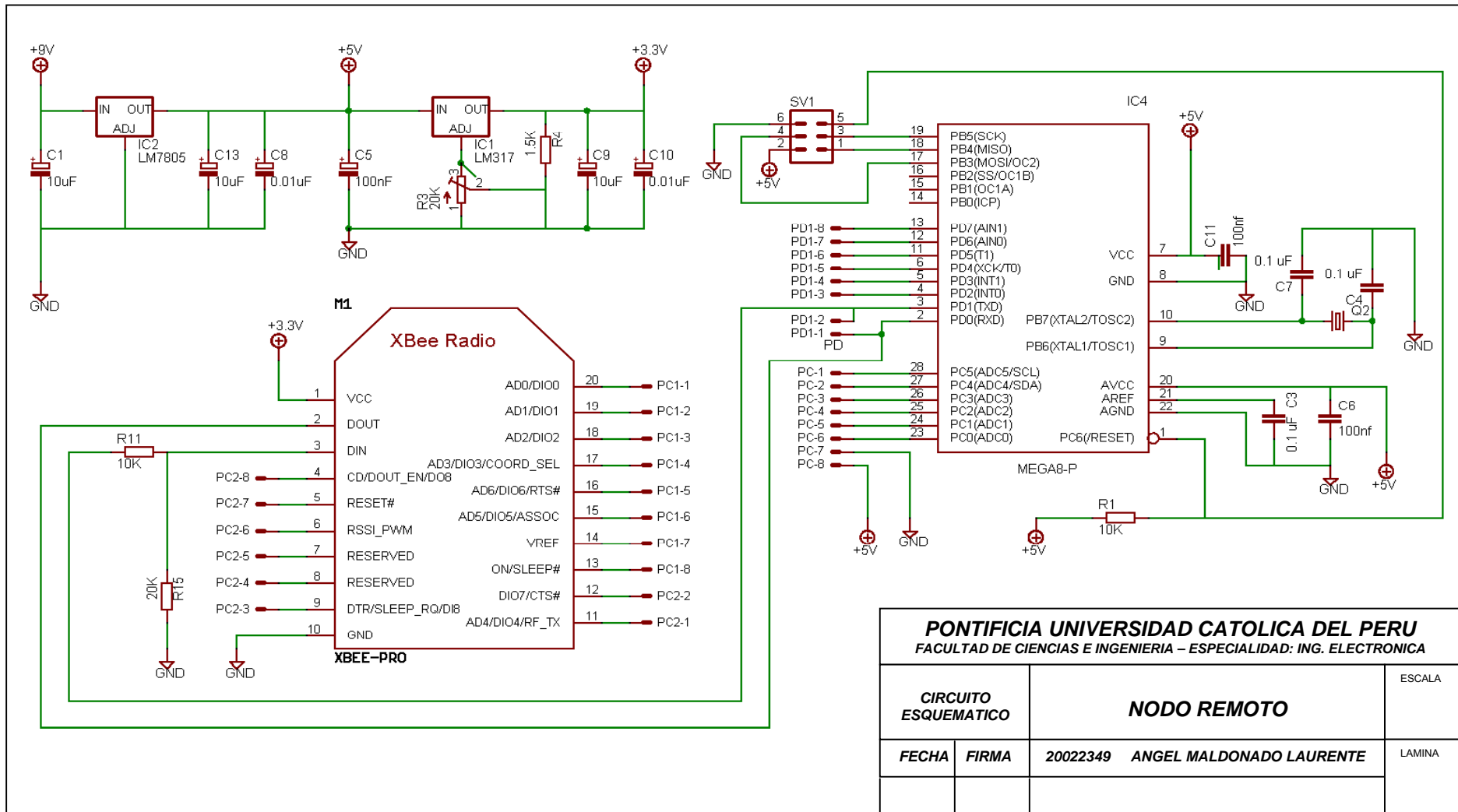


Figura 4.10: Esquemático del nodo remoto

4.3.2.2 Arquitectura del dispositivo centralizado

El dispositivo centralizado configurado como coordinador tiene como única función inicial la de formar una red. Se tiene un coordinador por red de área personal PAN formada, siendo este el responsable de organizar la PAN estableciendo el canal de operación y el identificador de la red.

Para formar la red, el coordinador permite a los routers y a los dispositivos terminales unirse, finalizado este proceso el coordinador funciona como un router pudiendo rutear paquetes desde/hacia otros nodos, ser una fuente/destino de paquetes de datos y administrar la energía consumida durante su operación.

En la figura 4.11 se aprecia la arquitectura del nodo coordinador, el cual está compuesto por una fuente de alimentación, un microcontrolador, un transmisor-receptor de radio frecuencia y un soporte de entrada/salida para interactuar con los diferentes periféricos como el teclado, leds indicadores y la pantalla LCD donde se visualizará información relevante de la planta.

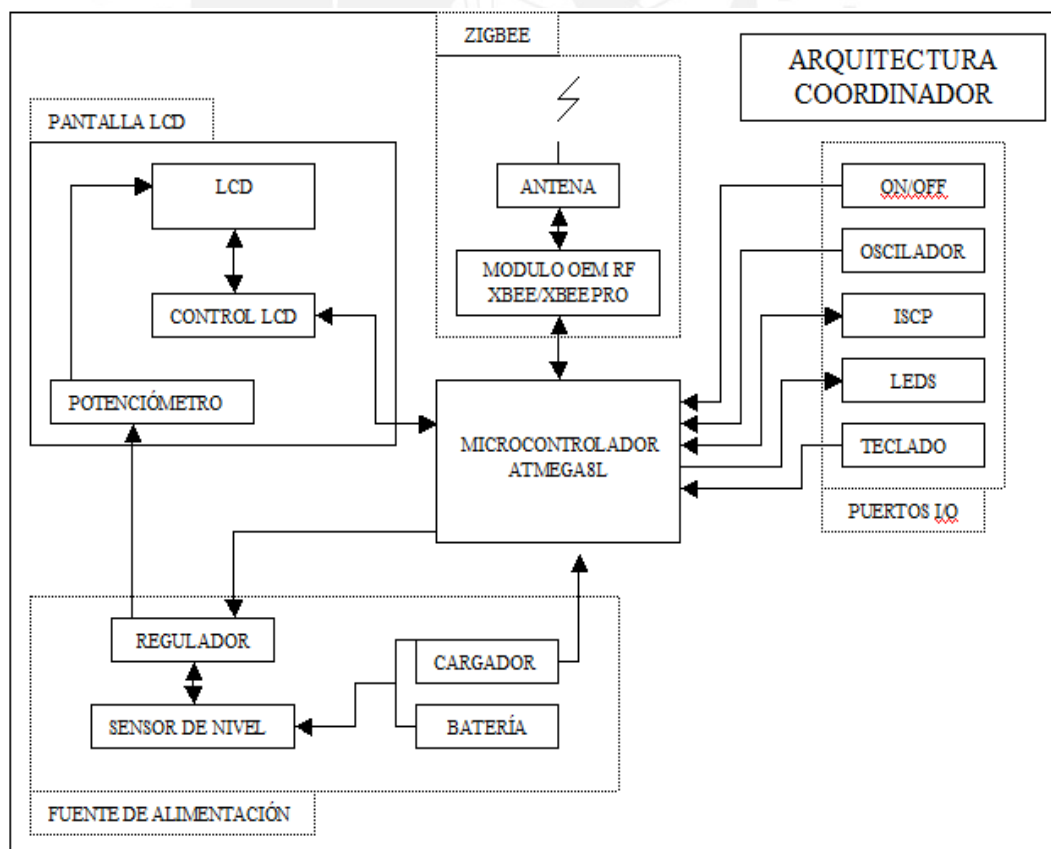


Figura 4.11: Arquitectura del nodo coordinador

A continuación se describen las principales características de todos los componentes involucrados en la arquitectura del nodo coordinador:

- a) Fuente de alimentación: Se utiliza una fuente de alimentación externa con respaldo de energía para alimentar a todos los elementos del nodo, debido al alto consumo de corriente que demandan durante la operación de la red.
- b) Microcontrolador: Es el elemento principal del nodo coordinador, controla el flujo de la información a través de los elementos del nodo y permite la recolección, procesamiento y almacenamiento de la información recibida. Realiza el control y la configuración de los nodos remotos y genera la interfaz con el usuario ubicado en la planta mostrando información relevante en la pantalla LCD.
- c) Radio transmisor-receptor: Realiza la transmisión y recepción de datos vía radiofrecuencia para la comunicación entre los nodos remotos y el coordinador, y entre este y la estación base. Se utiliza el módulo XBee-Pro, debido a que se requiere cubrir una mayor distancia durante la retransmisión a la estación base.
- d) Pantalla LCD: Esta pantalla sirve de interfaz para mostrar la información proveniente de los tanques de cultivo, de manera visual mediante un menú de selección que permite elegir entre los diferentes parámetros adquiridos.
- e) Puertos I/O: Los puertos de entrada/salida permiten interactuar con el nodo coordinador, mediante estos se realiza la programación ISP (Programación en sistema instalado), se conectan leds indicadores de eventos y se permite la interacción con el usuario a través del teclado matricial y la pantalla LCD.
- f) Software: Se desarrolla el software adecuado para coleccionar, almacenar, procesar, transmitir y rutear la información, permitiendo una operación autónoma de la red inalámbrica. Permite realizar la configuración y el control de los nodos remotos y mostrar la información recibida en la pantalla LCD.
- g) Hardware: Es seleccionado para cumplir con los requerimientos de tamaño y capacidad adecuados, y con una carcasa que soporte las condiciones ambientales dentro del invernadero donde opera la planta acuícola.

En la figura 4.12 se muestra el circuito diseñado en base a la arquitectura descrita.

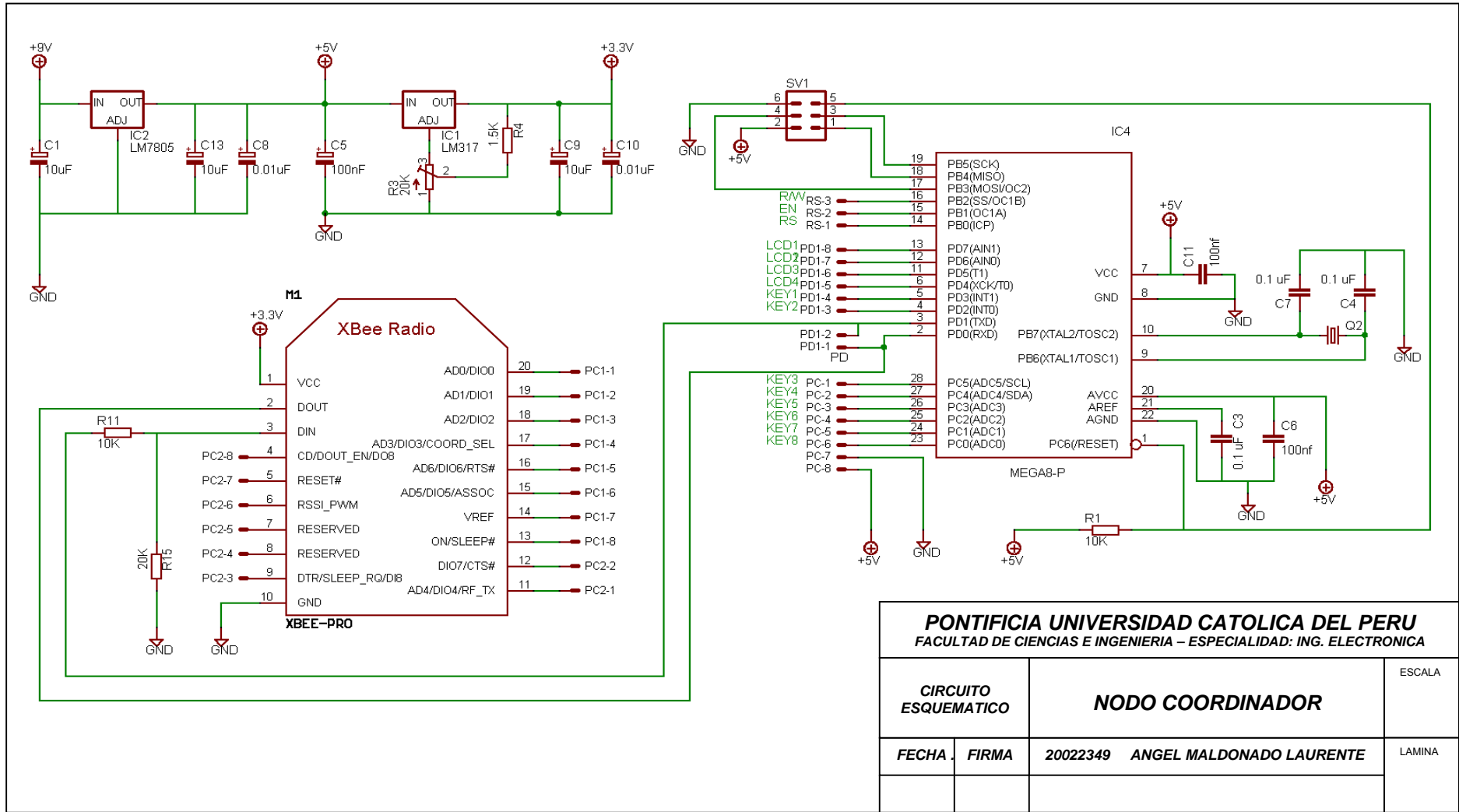


Figura 4.12: Esquemático del nodo coordinador

4.3.2.3 Arquitectura de la estación base

La función principal de la estación base es la de recibir la información proveniente de la Planta Acuícola PUCP enviada por el nodo coordinador. Esto se logra mediante una interfaz USB, que permite la conexión del módulo transmisor-receptor XBee-Pro con la computadora, de esta manera los datos recibidos por el módulo son enviados al puerto USB de la computadora.

Para adquirir la información recibida por el puerto USB, se desarrolló el programa AQUAPUCP v.1.0., mediante el cual se realiza el manejo y la utilización de los datos recibidos para ejecutar diversas tareas como el almacenamiento, procesamiento y visualización. Este programa permite también el envío de comandos para realizar la configuración y el mantenimiento de la red inalámbrica.

Los elementos que componen la estación base se muestran en la figura 4.13, estos son el transmisor-receptor XBee-Pro, los puertos de entrada/salida, la interfaz USB que permite conectar el módulo XBee a la computadora, y una computadora personal. La alimentación es realizada a través de la interfaz USB, tomando la energía de la computadora a la que es conectada.

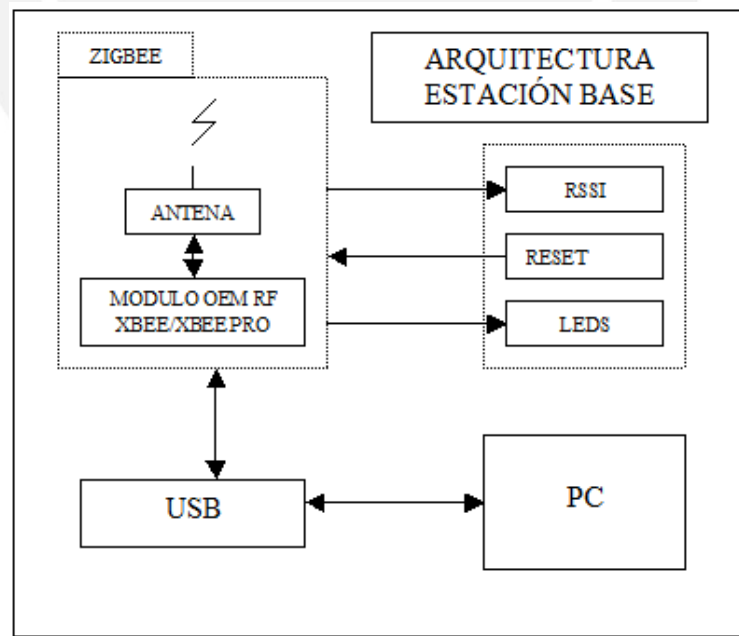


Figura 4.13: Arquitectura de la estación base

En la figura 4.14 se muestra el circuito diseñado en base a la arquitectura descrita.

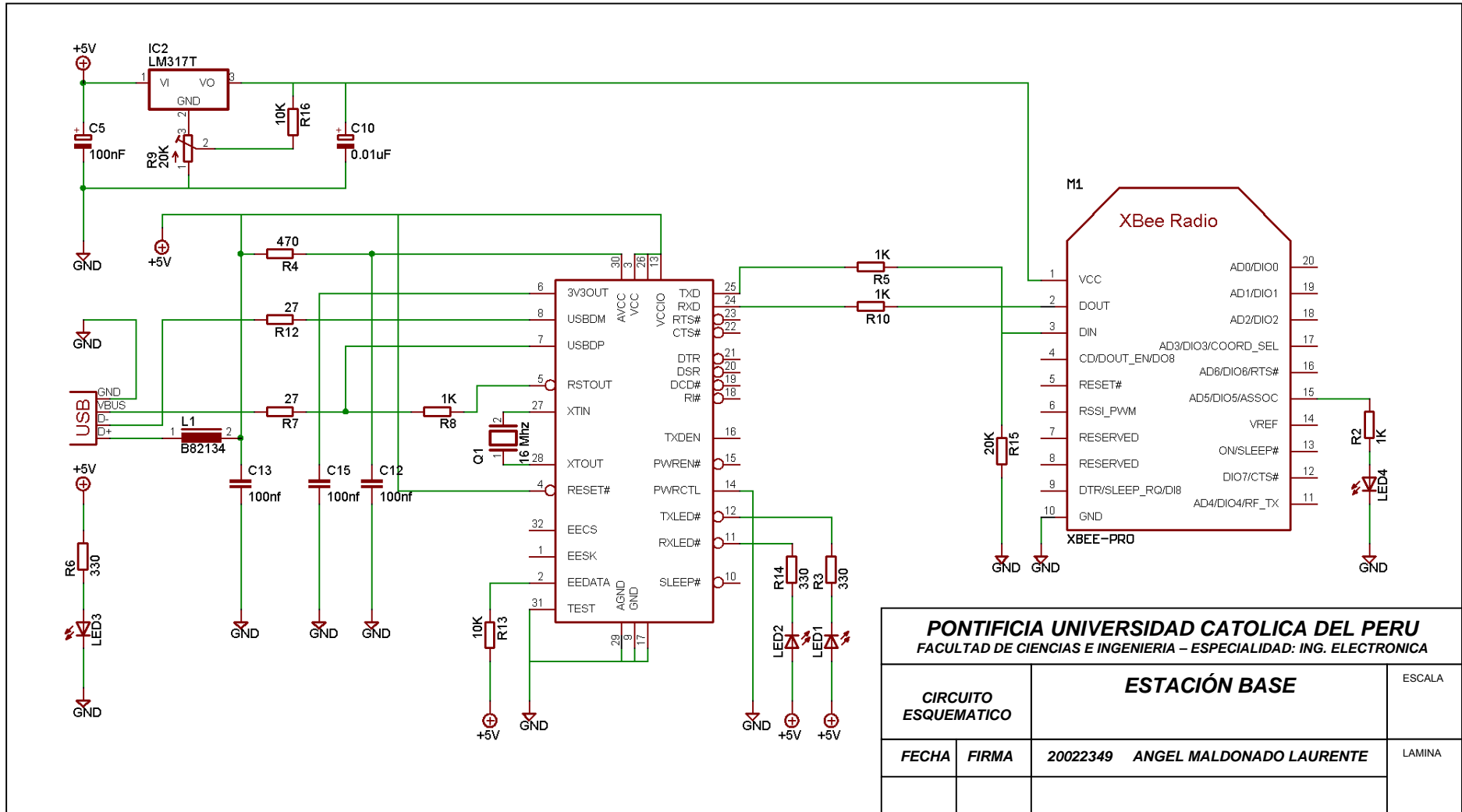


Figura 4.14: Esquemático de la estación base

4.3.2.4 Fuente de alimentación del nodo coordinador

El diseño de la fuente de alimentación es realizado para permitir una operación autosostenida de la red inalámbrica, teniendo un respaldo de energía cuando la red eléctrica falla. En la figura 4.15 se muestra el circuito esquemático y se detallan los componentes que forman parte de la fuente que proporciona +9 VDC a partir de 220 VAC y a través de un transformador AC de -15 - 0 - +15 voltios a 2 amperios.

El funcionamiento de la fuente es el siguiente: la tensión de 220 VAC ingresa mediante el *switch* de encendido al transformador AC reduciéndolo a 15 Voltios AC, esta tensión es rectificadora mediante un puente de diodos, y con el condensador de 1000 uF se disminuye el rizado estabilizando el voltaje a la salida.

El regulador de tensión 7812 permite obtener +12 VDC estables, se tienen dos condensadores de desacople a la salida y un LED que permite observar la presencia de tensión externa como elemento de protección. La tensión que entrega el regulador 7812 ingresa al terminal Normal Abierto (NA) del relé, el cual conmuta entre esta tensión y la que entrega la batería conectada al terminal Normal Cerrado (NC). El punto común (C) del relé va a un condensador de 4700 uF que mantiene la corriente estable mientras se realiza el cambio de tensión.

Cuando existe tensión a la entrada del regulador 7812, este entrega a su salida +12 V, y el relé se encuentra con las terminales C y NA en corto, por ello los +12 voltios del regulador pasan directamente a la salida del relé. Cuando no hay alimentación externa, el relé se apaga y los contactos C y NC se colocan en corto, por lo tanto la tensión a la salida del relé proviene de la batería. Gracias al condensador de 4700 uF el cambio entre la fuente externa y la batería no se nota debido a que esta mantiene la tensión constante durante la conmutación.

Los +12 voltios que ingresan al regulador 7812 son inyectados a la batería para mantenerla cargando, se limita la corriente mediante la resistencia de 33 Ohms con una potencia de 4W y se coloca un diodo protector para evitar que la batería se descargue y genere circulación de corriente en sentido inverso.

La tensión de +12 VDC a la salida del relé ingresa a un regulador 7809 que estabiliza la tensión a su salida en +9 Voltios, pasando por un condensador de 100 nF que filtra el voltaje de salida, la cual es entregada al nodo coordinador.

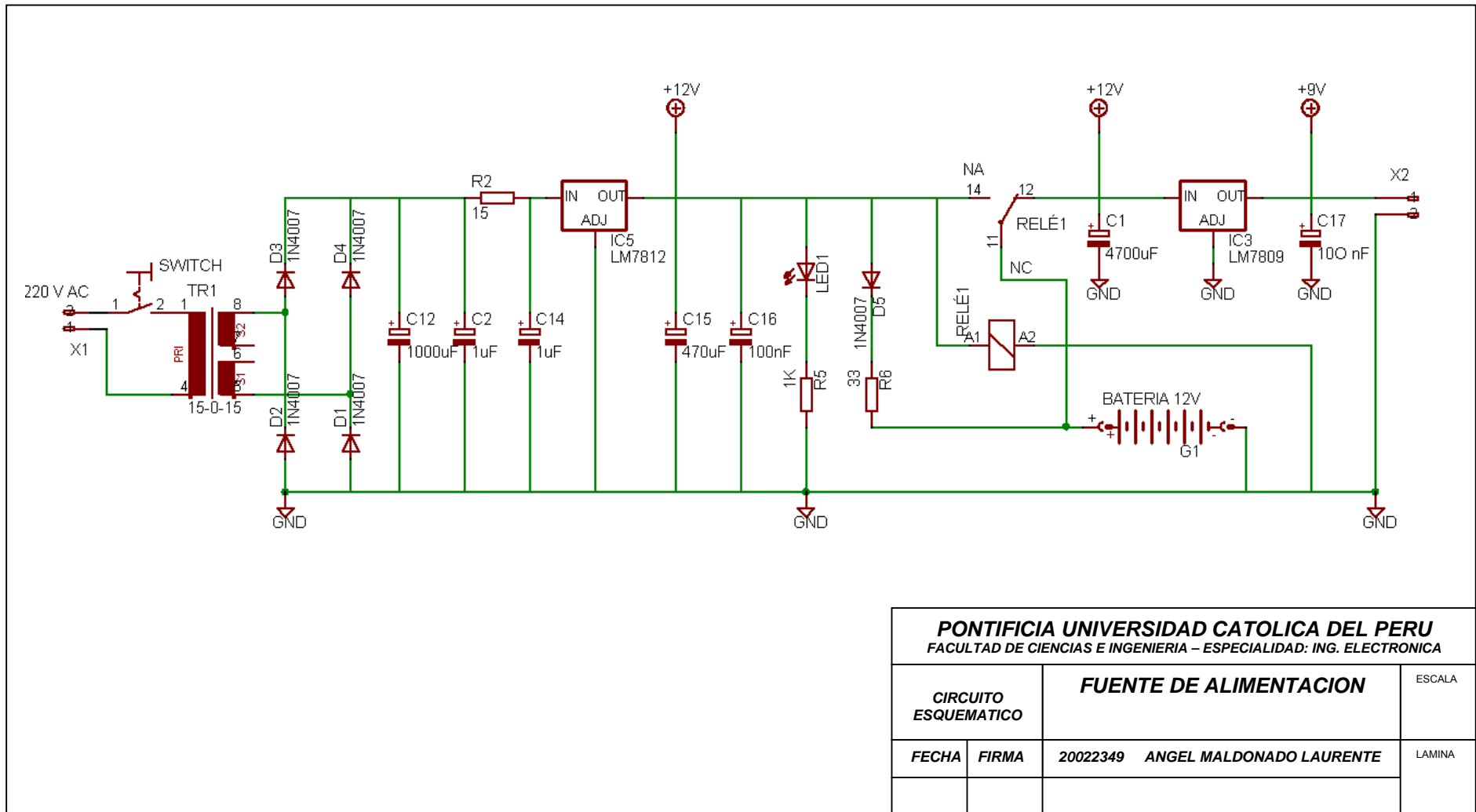


Figura 4.15: Fuente de alimentación del nodo coordinador

4.4 Pruebas realizadas

En esta parte de la investigación se describen las pruebas de campo que han sido desarrolladas con los módulos ZigBee. Se comienza con una descripción de la prueba de *loopback* y la configuración realizada, luego se describe la prueba de cobertura y las pruebas de operación con los elementos que formarán la red inalámbrica. En cada caso se realiza el análisis de los resultados obtenidos, incluyendo la discusión de aspectos como la tasa de paquetes errados (PER), el rango de cobertura y la transmisión de información analógica y digital.

4.4.1 Prueba de *Loopback*

La prueba de *loopback* analiza el regreso de los datos como el componente principal de la prueba. El hardware utilizado consiste de un maestro (una PC conectada a un módulo XBee) y un esclavo (un módulo XBee conectado a un microcontrolador ATmega8), esto se muestra en la figura 4.16.

Cuando el maestro envía un paquete de datos al esclavo, el esclavo inmediatamente envía de regreso este paquete al maestro. Un paquete es considerado perdido si el paquete que devuelve el esclavo al maestro no es recibido cuando se acaba el tiempo límite definido en milisegundos. Este valor límite puede ser asignado arbitrariamente para diferentes pruebas de *loopback*.

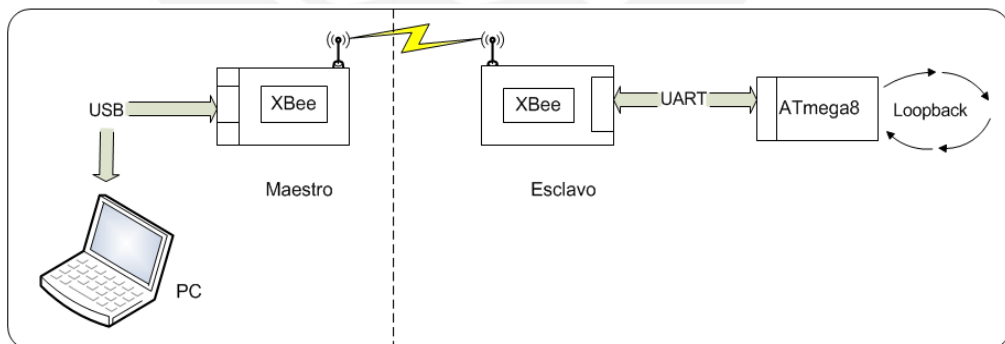


Figura 4.16: Esquema de la prueba de *loopback*

Las siguientes características de la comunicación son registradas durante la prueba de *loopback*: el número de paquetes perdidos, el máximo número de paquetes consecutivos perdidos en un tiempo determinado y la intensidad de la señal con la que se reciben los paquetes.

La prueba de campo realizada está basada en la prueba de *loopback*, con un maestro y un esclavo, como se observa en la figura 4.17. Para el maestro, se utiliza un módulo XBee-Pro montado sobre una tarjeta de desarrollo USB y conectado a una PC vía el puerto USB. El poder de transmisión es de +18 dBm, se utiliza la antena dipolo integrada al módulo XBee-Pro y la versión 10A1 del *firmware* ZigBee.

Para el esclavo, se utiliza un módulo XBee-Pro montado sobre un protoboard, y un microcontrolador ATmega8 con el software necesario para la prueba de *loopback*. El poder de transmisión es de +18 dBm, se utiliza una antena omnidireccional con 1.5 dBi de ganancia conectada al módulo XBee-Pro mediante un conector U.F.L y la versión 10A1 del *firmware* ZigBee.



Figura 4.17: Prueba de *loopback*

La prueba de *loopback* es configurada para realizar el envío de 1000 paquetes de datos a una tasa de 9600 baudios. Los paquetes enviados tienen un tamaño de 24 bytes y el valor del tiempo límite para considerar un paquete perdido se fue variando desde 0.5 ms hasta 1000 ms. Durante la prueba los paquetes son enviados al esclavo mediante el software X-CTU a través del puerto USB de la PC.

Finalizada cada prueba se muestran los resultados obtenidos, tales como el número total de paquetes enviados, perdidos y recibidos con éxito. También el máximo número de paquetes consecutivos perdidos y la intensidad de la señal recibida.

La tasa de paquetes errados (PER) se calcula utilizando la siguiente fórmula:

PER = Número de paquetes perdidos/ Número total de paquetes enviados.

Un valor de PER menor al 1% es considerado un nivel aceptable para este tipo de comunicación inalámbrica. [29]

En la tabla 4.3 se muestran los resultados obtenidos durante las diferentes pruebas de *loopback* realizadas, los detalles de estas pruebas se encuentran en el anexo 1.

Prueba	Tiempo límite de recepción de datos	Paquetes enviados	Paquetes recibidos	Paquetes perdidos	RSSI promedio	PER
1	0.5 ms	1000	481	519	-46 dBm	51.90%
2	1 ms	1000	489	511	-55 dBm	51.10%
3	5 ms	1000	496	504	-55 dBm	50.40%
4	10 ms	1000	500	500	-57 dBm	50.00%
5	20 ms	1000	500	500	-46 dBm	50.00%
6	30 ms	1000	13	987	-48 dBm	98.70%
7	40 ms	1000	13	987	-48 dBm	98.70%
8	50 ms	1000	973	27	-57 dBm	2.70%
9	60 ms	1000	990	10	-44 dBm	1.00%
10	70 ms	1000	1000	0	-60 dBm	0.00%
11	100 ms	1000	1000	0	-57 dBm	0.00%
12	1000 ms	1000	1000	0	-55 dBm	0.00%

Tabla 4.3: Resultados de la prueba de *loopback* (Fuente: Elaboración propia)

Analizando los resultados obtenidos durante esta prueba, se concluye que para asegurar la fiabilidad de la comunicación con un nivel de PER menor al 1%, se debe transmitir con un tiempo límite de recepción de datos mayor a 60 ms. Este valor es adecuado a la aplicación desarrollada en esta investigación debido a que se utilizan sensores con bajas tasas de muestreo de adquisición de la información.

El valor de PER en algunos casos es el mismo, pero esto no es suficiente para medir cuan confiable es una comunicación, la razón es que el PER no toma en cuenta el número consecutivo de paquetes perdidos durante la prueba. Este valor es importante debido a que un número alto de paquetes perdidos consecutivamente tiene efectos negativos sobre la fiabilidad de una comunicación, especialmente si se trata de comunicaciones críticas.

4.4.2 Prueba de Cobertura

4.4.2.1 Herramienta utilizada

En esta prueba se utiliza el software de uso libre X-CTU que permite detectar y medir la cobertura de redes inalámbricas basadas en los estándares IEEE 802.15.4 y ZigBee. El hardware utilizado consiste de un módulo XBee montado sobre una tarjeta de desarrollo conectada a una computadora a través del puerto USB y un nodo remoto transmitiendo paquetes de datos continuamente.

Esta prueba es realizada en un entorno real para predecir el modelo *indoor* de la cobertura de propagación de las señales de radiofrecuencia transmitidas desde la planta acuícola. Este modelo es válido ya que permite predecir el comportamiento de las señales radioeléctricas, se ajusta a la realidad y es coherente con los conocimientos teóricos. La prueba fue realizada utilizando un nodo remoto y la estación base que es desplazada a lo largo del área de operación de la red midiendo los niveles de la intensidad del enlace inalámbrico.

Como aplicación inmediata del modelo obtenido durante esta prueba, se puede plantear el hecho de poder descubrir la cantidad y la ubicación adecuada de los dispositivos de radiofrecuencia, para lograr los objetivos de cobertura deseados.

4.4.2.2 Pruebas de Cobertura del Pabellón V de Electrónica, Informática y Telecomunicaciones

Las pruebas fueron realizadas el día 07 de agosto del año 2008, desde las 6:00 p.m. hasta las 9:00 p.m., midiendo la cobertura en los diferentes ambientes del primero, segundo y tercer piso del pabellón V.

Se comenzó recorriendo todos los ambientes en un intervalo aproximado de 3 horas. Durante los primeros minutos se midió la cobertura en el extremo del tercer piso más cercano a la Planta Acuícola PUCP y en los siguientes minutos se recorrió el sector que va desde el hall hasta las oficinas de los profesores pasando por el pasillo, la sala de reuniones y la sala de profesores. Finalmente se midió el sector que va desde el área de la recepción hasta el hall de entrada en el otro extremo del pabellón, con esto se logró medir la potencia de recepción en los diferentes ambientes y laboratorios del tercer piso del pabellón V.

En la tabla 4.4 se muestran los resultados obtenidos durante las pruebas realizadas en los diferentes ambientes del tercer piso. La potencia de recepción varía de acuerdo a la zona donde se efectúan las mediciones, estas ubicaciones son indicadas mediante números y son mostradas en la figura 4.18.

Medición de cobertura en el tercer piso del pabellón V																			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
-63	-79	-79	-87	-82	-82	-77	-85	-84	-93	-90	-86	-95	-85	-88	-93	-95	-95	-98	-82
-61	-77	-82	-82	-82	-79	-79	-82	-85	-91	-90	-84	-93	-87	-86	-92	-88	-94	-98	-90
-62	-78	-81	-85	-82	-81	-78	-84	-85	-92	-90	-85	-94	-86	-87	-93	-92	-95	-98	-86
Promedio de la potencia de recepción																			

Tabla 4.4: Resultados de la prueba de cobertura (Fuente: Elaboración propia)

Analizando los resultados, se observa que la potencia de recepción medida está entre -63 dBm y -95 dBm. Entre el sector del hall y las oficinas de profesores hay una mayor potencia de recepción debido a la cercanía con la planta y la existencia de un menor número de elementos de atenuación como paredes de concreto, divisiones de *drywall* y ventanas de vidrio. En el sector de la recepción y los pasillos se tiene una intensidad de recepción media, mientras que en los laboratorios del área de telecomunicaciones la señal es tenue y se pierde casi por completo.

Se concluye que el área de cobertura adecuada para garantizar una comunicación eficiente asegurando una buena potencia de recepción de la señal durante todo el tiempo, está entre la planta acuícola y las área que comprenden las oficinas de profesores, la sala de reuniones y la sala de profesores. Con esto se garantiza el área de cobertura mínima de 60 m, especificado en los requerimientos de diseño.

Con estas precisiones se muestra en la figura 4.18 la cobertura de la red y se define que la mejor ubicación de la estación base será en la oficina del Ing. Ángelo Velarde Criado, debido a que el área comprendida entre el pasillo y las oficinas de profesores brindan las mejores condiciones para el buen desempeño de la red inalámbrica.

Luego de efectuadas las mediciones en los ambientes del tercer piso, también se realizó mediciones en las áreas del primer y segundo piso del pabellón V, donde se obtuvieron resultados similares. En el anexo 2 se describen detalladamente las pruebas de cobertura realizadas y se muestran los resultados obtenidos.

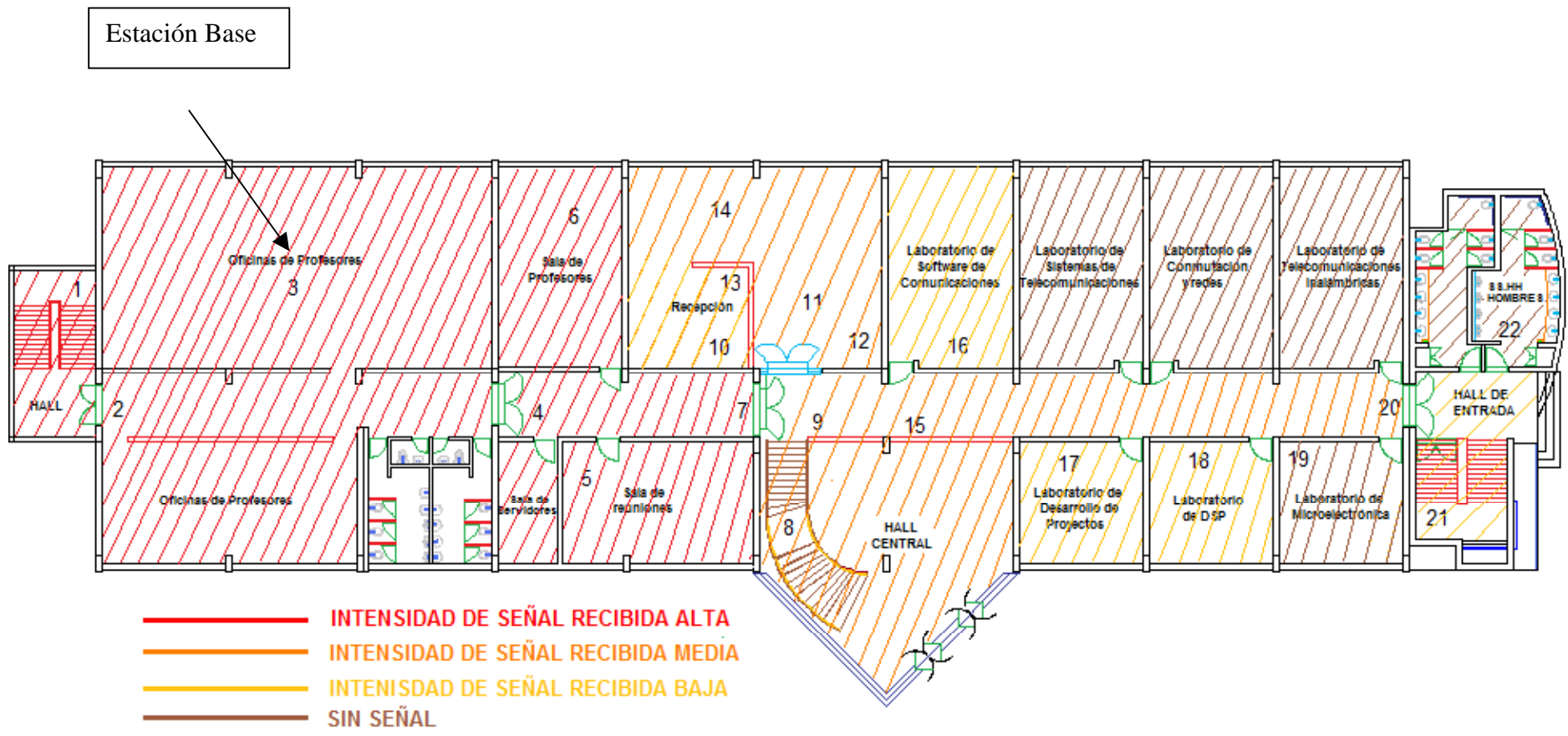


Figura 4.18: Cobertura y ubicación de la Estación Base en el tercer piso

4.4.3 Transmisión de PC a PC utilizando el software X-CTU

En esta prueba se utiliza el software de configuración y visualización X-CTU para validar la transmisión y recepción de paquetes de datos entre dos computadoras, y también para realizar la configuración de las diversas características con las que cuentan los módulos XBee para su operación dentro de la red inalámbrica.

El hardware utilizado consiste de dos módulos XBee, conectados a través de las interfaces de desarrollo a cada computadora. Durante la prueba se transmitió paquetes de datos y comandos de configuración, observando los resultados obtenidos al variar diversos parámetros como la tasa de transferencia, la paridad, y el número de bits de inicio, bits de datos y bits de parada. También se realizó la actualización del *firmware* y la configuración de la dirección fuente/destino, tasa de muestreo y el tamaño de cada paquete transmitido.

Esta prueba también fue ejecutada utilizando el Hyperterminal, el cual permite la comunicación a través del puerto serial de la computadora. En la figura 4.19 se muestra el resultado de la transmisión de un paquete de datos.

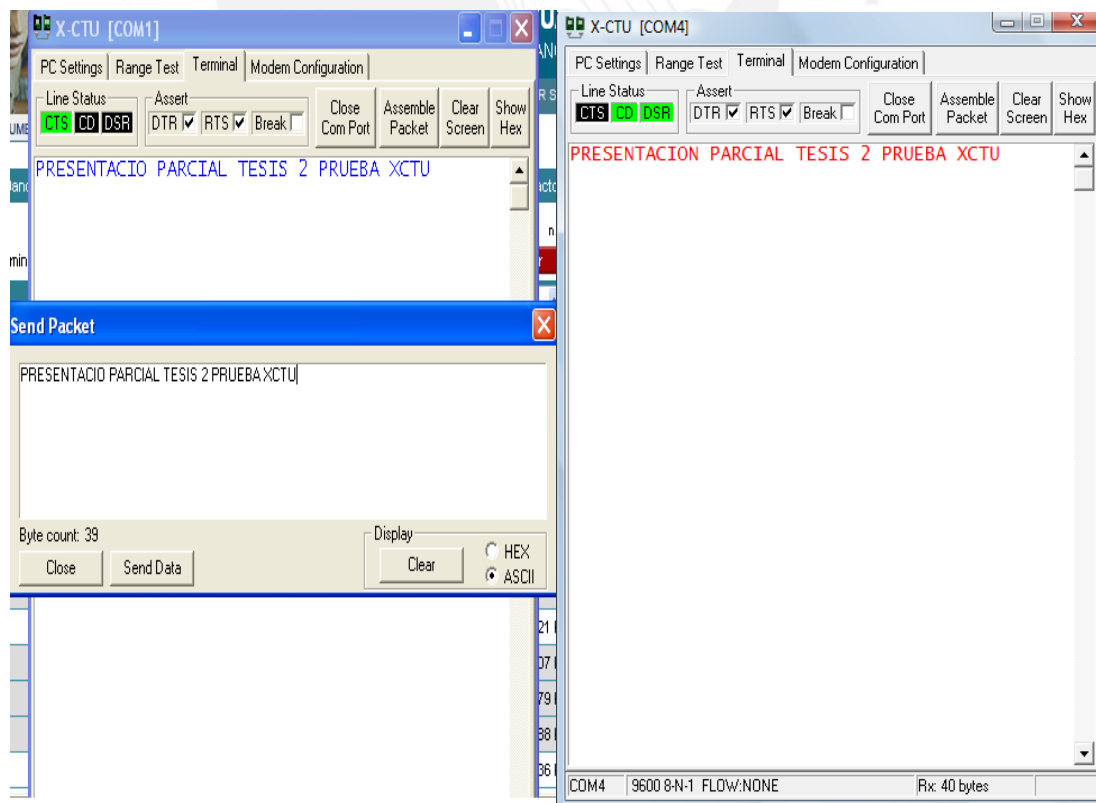


Figura 4.19: Transmisión (izquierda) y recepción (derecha) usando X-CTU

4.4.4. Transmisión con el software de monitoreo AQUAPUCP v1.0

Para realizar esta prueba se desarrolló el software de monitoreo para el entorno Windows XP utilizando Visual Basic 6.0. Este programa permite la adquisición, transmisión y recepción de datos a través del puerto serie de la computadora.

El programa AQUAPUCP v1.0 posee una interfaz sencilla que muestra información en tiempo real de los parámetros críticos como la temperatura, el oxígeno disuelto, el pH y el flujo. Adicionalmente cuenta con opciones para realizar el envío de paquetes de datos y comandos de configuración, abrir datos almacenados, guardar los datos recibidos y graficar la evolución de los parámetros en función del tiempo.

Durante la prueba se realizó la recepción de paquetes de datos enviados desde un nodo remoto. Esta información fue recibida por la computadora y mediante el programa de monitoreo activado fue mostrada en la ventana del parámetro temperatura, como se observa en la figura 4.20. También se realizó la transmisión de paquetes de datos y comandos de configuración mediante el comando de envío de datos, información que fue recibida por el nodo remoto y retransmitida de vuelta.

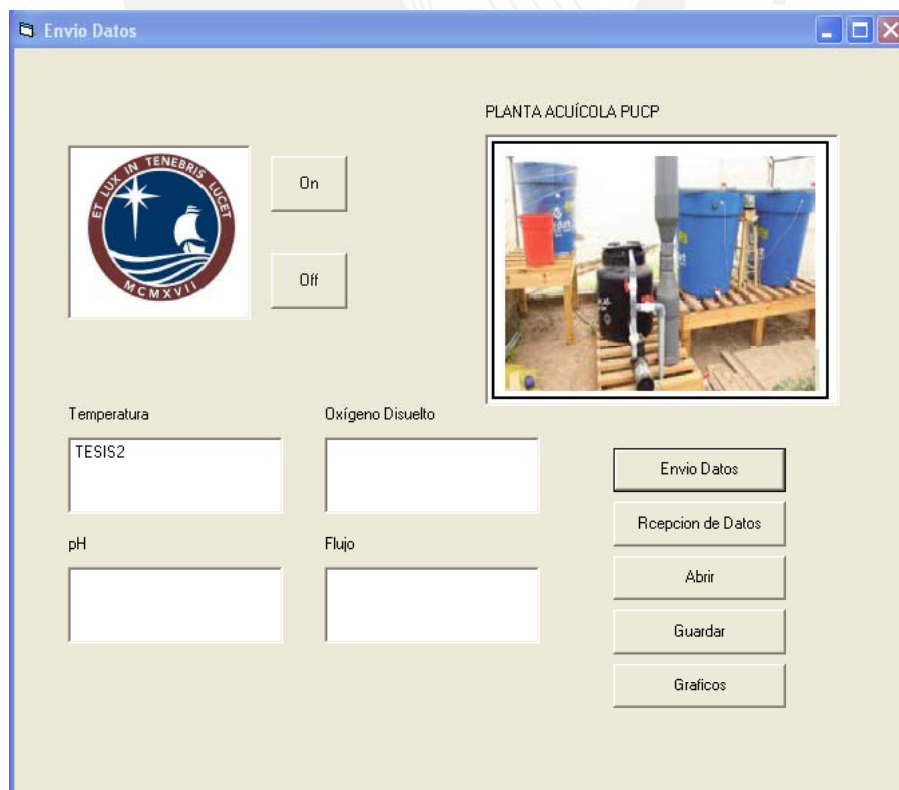


Figura 4.20: Resultados utilizando el software AQUAPUCP v1.0

4.5 Presentación del diseño

En esta sección se realiza la presentación de la red inalámbrica que cumple con los requerimientos de diseño descritos en el capítulo anterior y tomando como base la selección y diseño de todos los elementos de hardware y software necesarios para una operación adecuada dentro del entorno de producción acuícola.

En este diseño se tiene definido la topología de la red, el número de los nodos, la configuración de la red y la lógica correspondiente al protocolo ZigBee que permite interpretar los datos que son transmitidos o recibidos.

4.5.1 Diagrama de la red

El área de operación de la red inalámbrica corresponde a las inmediaciones entre la Planta Acuícola PUCP y el pabellón V, donde la distancia aproximada entre estas construcciones es de 40 metros.

El diagrama de la red inalámbrica ZigBee muestra que se tienen cuatro nodos remotos, un nodo coordinador y una estación base. Con estos elementos se cubre el monitoreo de la temperatura, el oxígeno disuelto, las concentraciones de CO₂ y el pH. Los nodos remotos y el nodo coordinador se encuentran dentro de la Planta Acuícola PUCP mientras que la estación base se ubica en la oficina del Ing. Ángelo Velarde Criado en el pabellón V de Electrónica, Informática y Telecomunicaciones.

La topología de la red es punto-multipunto, la cual fue seleccionada tomando como base los resultados obtenidos durante la prueba de cobertura realizada. Con esta topología se cubre el requerimiento de cobertura especificado para el diseño de la red inalámbrica, descartando el uso de la topología malla debido a que no se requiere cubrir grandes distancias.

Los nodos remotos están ubicados a 60 cm del suelo colocados sobre la base de madera que soporta a los tanques de cultivo. El nodo coordinador está al lado izquierdo de la entrada a la planta, colocado sobre una base de madera a 120 cm del suelo y la estación base se encuentra ubicado sobre el escritorio del Ing. Ángelo Velarde Criado en el pabellón V. En la figura 4.21 se presenta el diagrama de la red inalámbrica, donde se observa la ubicación de los nodos remotos, el nodo coordinador y la estación base distribuidos en una topología punto-multipunto.

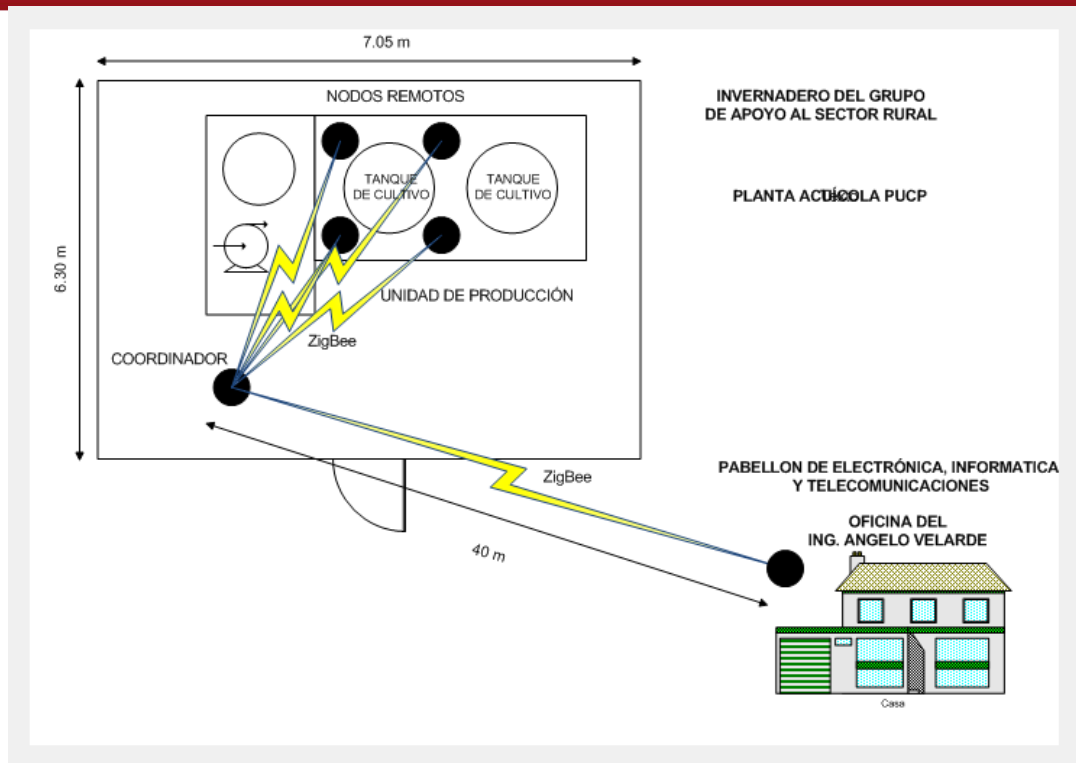


Figura 4.21: Diagrama de la red inalámbrica

En la tabla 4.5 se muestra la configuración de los nodos remotos, el nodo coordinador y la estación base, para una operación adecuada y acorde con el diagrama de la red inalámbrica. Se tienen definidos la conexión del sensor, la dirección fuente y destino, y la habilitación de un nodo como coordinador.

Nodo	Módulo	Sensor	Conexión del sensor	Dirección fuente	Dirección destino	Habilitador del coordinador
Estación Base	XBee-Pro	-	-	8000	4000	0
Coordinador	XBee-Pro	-	-	4000	8000	1
Remoto 1	XBee	Temperatura	módulo	2000	4000	0
Remoto 2	XBee	pH	uC	2001	4000	0
Remoto 3	XBee	Oxígeno disuelto	uC	2002	4000	0
Remoto 4	XBee	CO ₂	uC	2003	4000	0

Tabla 4.5: Configuración de la red inalámbrica (Fuente: Elaboración propia)

De esta manera podemos observar en la tabla que el sensor de temperatura es el único que está conectado directamente al módulo transmisor–receptor ZigBee, los demás sensores son conectados al microcontrolador que posee cada nodo remoto.

La configuración del coordinador se realiza colocando a 1 el habilitador del coordinador, mientras que los demás nodos son configurados como dispositivos terminales colocando este parámetro a 0. Las direcciones destino y fuente de cada módulo son elegidas arbitrariamente.

4.5.2 Tramas de transmisión y recepción

La trama que se utiliza para la transmisión y recepción de los paquetes de datos es descrita a continuación, la cual depende de la forma como están conectados los sensores. Cuando se tiene el sensor conectado al microcontrolador, este es el encargado de la creación de la trama a transmitir correspondiente al estándar ZigBee. Si el sensor es conectado directamente al módulo transmisor-receptor XBee, la trama siempre es enviada utilizando el modo API independientemente de si el módulo está configurado para operar de esta manera.

4.5.2.1 Sensores conectados al microcontrolador

Cuando se realiza la conexión de sensores analógicos/digitales a los canales ADC e I/O del microcontrolador ATmega8L, la información adquirida es enviada a través del UART utilizando el formato de la trama de datos que se muestra a continuación. Esta corresponde al modo API y es gestionada por el microcontrolador.



Figura 4.22: Formato de la trama enviada por el microcontrolador

Para analizar la lógica seguida durante el funcionamiento de la red, se describe la transmisión de datos utilizando una trama recibida como ejemplo. Se debe tener en cuenta que cuando la red se encuentra configurada y operando esta trama se repite siempre y sólo cambia en aquellos bytes que corresponden a los datos adquiridos.

7E 00 09 83 65 87 00 03 00 01 01 23 79

7E: Identificador de Inicio de Trama.
 00 09: Longitud de los datos (9 bytes a continuación mas uno de checksum).
 83: Indica recepción de datos de I/O.
 65 87: Dirección fuente, de quien envía la información.
 00 03: Indica los canales habilitados (ADC0, ADC1).
 00 01: Estado de ADC0 muestra 1.
 01 23: Estado de ADC1 muestra 1.
 79: Checksum.

4.5.2.2 Sensores conectados al módulo XBee

Cuando se conectan sensores analógicos/digitales utilizando los canales ADC e I/O del módulo XBee, independientemente de su configuración, siempre se envía la información adquirida a través de la UART utilizando la estructura de la trama API. Se muestra la siguiente trama recibida para describir transmisión de datos. [34]

7E 00 14 83 65 87 49 00 02 14 01 00 01 01 23 02 34 00 00 01 24 02 35 79

7E: Identificador de Inicio de Trama.
 00 14: Longitud de los datos (20 bytes a continuación mas uno de checksum).
 83: Indica recepción de datos de I/O.
 65 87: Dirección fuente, de quien envía la información.
 49 : RSSI Nivel de recepción de la señal.
 00 : Opciones.
 02 : Cantidad de muestras a tomar por cada entrada antes de transmitir.
 14 01: Indica los canales habilitados (AD3 AD1 D0).
 00 01: Estado de I/O muestra 1.
 01 23: Estado de AD1 muestra 1.
 02 34: Estado de AD3 muestra 1.
 00 01: Estado de I/O muestra 2.
 01 24: Estado de AD1 muestra 2.
 02 35: Estado de AD3 muestra 2.
 79: Checksum.

Cuando la red inalámbrica se encuentra configurada y operando, los datos se transmiten siempre con el mismo formato. De esta manera para acceder a la información recibida, sólo se toman los bytes que representan valores importantes.

4.6 Simulación de la red y puesta en funcionamiento

Para la simulación de la operación y el funcionamiento de la red inalámbrica, se realizó la implementación de circuitos de prueba para todos los elementos que componen la red inalámbrica, con los cuales se pudo comprobar que los valores seleccionados eran adecuados. Luego se realizó diversas pruebas para observar el funcionamiento de los circuitos durante la operación de la red y ajustar los valores seleccionados para mejorar su desempeño.

A continuación se desarrolla el procedimiento seguido para la simulación del funcionamiento de la red inalámbrica que permite validar y garantizar una operación adecuada y sin inconvenientes. En la figura 4.23 se muestran los circuitos de prueba contruidos de dos nodos remotos y el nodo coordinador.

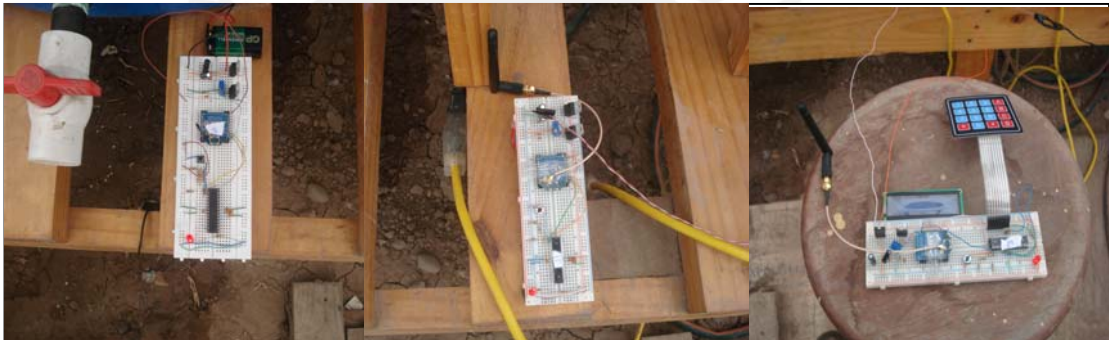


Figura 4.23: Nodo1 (izquierda), nodo2 (centro) y coordinador (derecha)

4.6.1 Transmisión analógica y digital mediante el módulo XBee

En este caso se valida la transmisión de información analógica y digital cuando los sensores van conectados directamente a los canales ADC y a los puertos de entrada/salida del módulo XBee. Para lograr esto se realizó la transmisión de la información adquirida de dos sensores analógicos y uno digital. El sensor analógico es simulado mediante una fuente DC de 3.3 V conectado a un potenciómetro que permite variar el nivel de tensión entregado al puerto ADC del módulo XBee.

En la tabla 4.6 se muestra la configuración del módulo XBee, teniendo en cuenta la conexión de los sensores. Los parámetros configurados son la dirección del módulo, los pines de entrada/salida, la tasa de muestreo y la cantidad de muestras que se tomarán antes de realizar cada transmisión.

Parámetro	Valor (Hex.)	Acción realizada
MY	2000	Dirección de la Fuente. Este comando MY=2000 configura la dirección del nodo remoto que envía la información.
ATD0	3	Configura una entrada como digital. Este comando ATD0=3 setea el pin AD0/DIO0 como entrada digital
ATD1	2	Configura una entrada como analógica, asociado al conversor análogo digital del módulo. Este comando ATD1=2 setea el pin AD1/DIO1 como entrada analógica.
ATD3	2	Configura una entrada como analógica, asociado al conversor análogo digital del módulo. Este comando ATD3=2 setea el pin AD3/DIO3 como entrada analógica.
ATIR	64	Setea la frecuencia de muestreo en milisegundos. Este comando ATIR=64 configura al módulo para tomar muestras cada 100ms.
ATIT	4	Permite tomar una determinada cantidad de muestras y luego enviarla, se tiene un espacio de buffer para 46 muestras. Este comando ATIT=4 toma cuatro muestras de todos los canales, espaciados según indica ATIR y luego lo envía a la estación base.

Tabla 4.6: Configuración del módulo XBee (Fuente: Elaboración propia)

En la figura 4.24 se muestra el circuito utilizado para esta prueba, donde los sensores analógicos y el sensor digital se conectan directamente al módulo XBee.

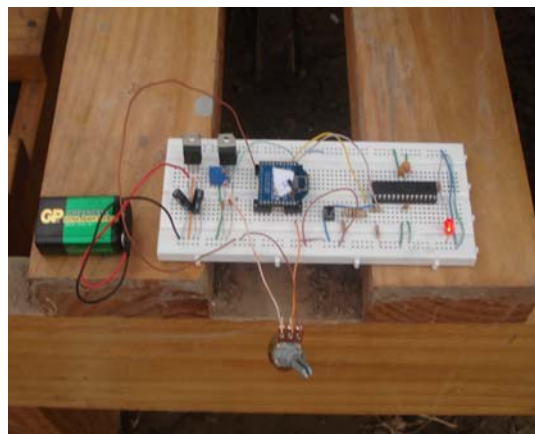


Figura 4.24: Sensor analógico y digital conectado al módulo XBee

Luego de haber realizado la conexión de los sensores y la configuración del nodo remoto, se inicia la operación de la red con la transmisión de datos desde este nodo. En la figura 4.25 se muestran los datos recibidos, donde la estructura de la trama es igual a la descrita anteriormente y conforme con la lógica enunciada. Para obtener información relevante sólo se toman aquellos bytes que corresponden a las posiciones donde se encuentran los datos, ya que los demás bytes no cambian.

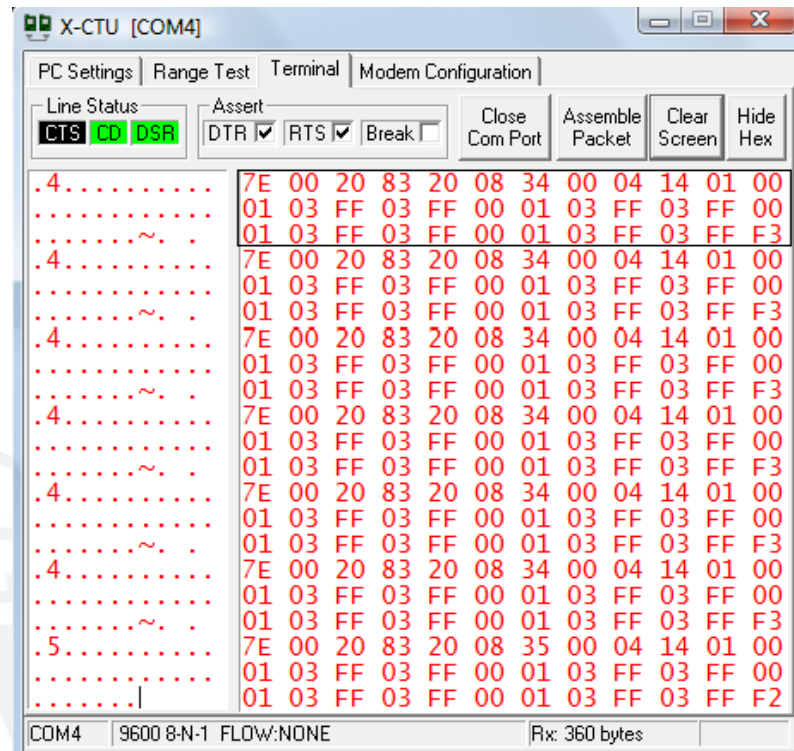


Figura 4.25: Recepción de información analógica y digital en tramas API

4.6.2 Transmisión y recepción de datos digitales

Para validar la transmisión de datos digitales, se realizó el almacenamiento de información en la memoria del microcontrolador del nodo remoto, el cual tiene conectado un sensor digital en una de sus entradas. Cuando el microcontrolador detecta una variación en el nivel de tensión que entrega el sensor digital, este realiza la transmisión de la información almacenada en la memoria.

Para validar la recepción de datos, se realizó la transmisión de una solicitud de envío de datos desde la computadora. Cuando el microcontrolador recibe la solicitud, envía como respuesta la información almacenada en sus registros. En la figura 4.26 se muestra el circuito utilizado durante la ejecución de esta prueba.

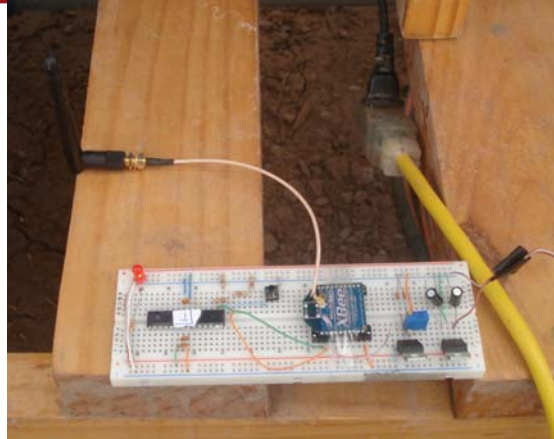


Figura 4.26: Sensor digital conectado al microcontrolador

4.6.3 Funcionamiento de la red inalámbrica

Para simular el funcionamiento de la red inalámbrica se instalaron los siguientes circuitos dentro de la planta acuícola, en las posiciones mostradas en la figura 4.27.

- Dos nodos remotos (cada uno instalado en un protoboard).
- Un nodo coordinador (instalado en un protoboard).
- Una estación base (utilizando una tarjeta de desarrollo USB XBee y una PC).



Figura 4.27: Sistema de comunicaciones

Durante la simulación se realizó la transferencia de datos desde dos nodos remotos hacia el nodo coordinador, y desde este nodo hacia la estación base. Los nodos remotos y el nodo coordinador fueron ubicados dentro de la Planta Acuícola PUCP en las posiciones indicadas, mientras que la estación base se colocó en la oficina del Ing. Ángel Velarde Criado en el pabellón V.

En la figura 4.35 se muestra la recepción de datos utilizando el software XCTU. Los resultados obtenidos permiten validar que los datos transmitidos desde la planta acuícola son recibidos en la estación base sin inconvenientes y con adecuados niveles en la potencia de recepción.



Figura 4.28: Datos recibidos en la Estación Base

4.7 Presupuesto de la investigación

En esta sección se analizan los costos derivados de la investigación, correspondientes a los equipos y a la instalación de la red inalámbrica propuesta por parte de personal calificado. Este presupuesto es elaborado en base a la información económica obtenida en el mercado local, y en el mercado internacional de aquellos productos que requieren ser importados.

4.7.1 Costo de los componentes de la red Inalámbrica

En las siguientes tablas se detallan los costos de todos los componentes y materiales necesarios para la instalación y puesta en marcha de la red inalámbrica.

Can	Componentes	Fabricante	Precio	Precio	Precio	Total
			USA \$	Perú \$	S/.	S/.
1	ATMEGA8-16PU	M. Local			13.00	13.00
1	Regulador L7805CV	M. Local			1.00	1.00
1	Regulador LM317T	M. Local			1.00	1.00
1	Resistencia 1.5K 1/4W	M. Local			0.10	0.10
4	Resistencia 10k 1/4W	M. Local			0.10	0.40
1	Módulo XBee W/WIRED ANT	Digi-Key	\$24.15	\$48.30	148.28	148.28
1	Potenciómetro de precisión 20K	M. Local			2.00	2.00
1	Condensador cerámico 10uF	M. Local			0.10	0.10
5	Condensador cerámico 1uF	M. Local			0.10	0.50
2	Condensador electrolítico 10uF	M. Local			0.10	0.20
1	Pulsador	M. Local			0.50	0.50
1	Socket 14 pines por lado	M. Local			2.00	2.00
1	PCB fibra de vidrio 30cm ²	M. Local		\$10.80	33.12	33.12
1	Conector 6 pines	M. Local			1.00	1.00
4	Molex 8 pines	M. Local			0.50	2.00
1	Bornera 2 pines	M. Local			1.00	1.00
1	Batería 9V	M. Local			7.00	7.00
					Total	213.20

Tabla 4.7: Costo de los equipos y materiales de un nodo remoto
 (Fuente: Elaboración propia)

Can	Componentes	Fabricante	Precio	Precio	Precio	Total
			USA	Perú	S/.	S/.
1	ATMEGA8-16PU	M. Local			13.00	13.00
1	Regulador L7805CV	M. Local			1.00	1.00
1	Regulador LM317T	M. Local			1.00	1.00
1	Resistencia 1.5K 1/4W	M. Local			0.10	0.10
4	Resistencia 10k 1/4W	M. Local			0.10	0.40
1	Módulo XBee-Pro W/U FL ANT	Digi-Key	\$36.65	\$73.30	225.03	225.03
1	Potenciómetro de precisión 20K	M. Local			2.00	2.00
1	Condensador cerámico 10uF	M. Local			0.10	0.10
5	Condensador cerámico 1uF	M. Local			0.10	0.50
2	Condensador electrolítico 10uF	M. Local			0.10	0.20

1	Pulsador	M. Local			0.50	0.50
1	Socket 14 pines por lado	M. Local			2.00	2.00
1	Pantalla LCD	M. Local			17.00	17.00
1	Teclado Matricial	M. Local			12.00	12.00
1	Conector 6 pines	M. Local			1.00	1.00
1	PCB fibra de vidrio 30cm ²	M. Local		\$10.80	33.16	33.16
1	Bornera 2 pines	M. Local			1.00	1.00
4	Molex 8 pines	M. Local			0.50	2.00
					Total	311.99

Tabla 4.8: Costo de los equipos y materiales del nodo coordinador

(Fuente: Elaboración propia)

Can	Componentes	Fabricante	Precio	Precio	Precio	Total
			USA	Perú	S/.	S/.
2	Bornera 2 pines	M. Local			1.00	2.00
1	Switch	M. Local			1.50	1.50
1	Transformador -15-0-15 @ 2A	M. Local			18.00	18.00
1	Regulador LM7812	M. Local			1.00	1.00
1	Regulador LM7809	M. Local			1.00	1.00
1	Relé JQ1APF-F-12V	Digi-Key	\$1.43	\$2.86	8.78	8.78
1	Batería B.B. 12V BP1.2-12-T1	M. Local	\$17.93	\$35.86	110.10	110.10
5	Diodo 1N4007	M. Local			0.10	0.50
1	Led	M. Local			0.20	0.20
1	Resistencia 15 Ohms.	M. Local			0.10	0.10
1	Resistencia 33 Ohms.	M. Local			0.10	0.10
1	Resistencia de 1K	M. Local			0.10	0.10
1	Condensador 1000uF	M. Local			0.20	0.20
1	Condensador 470 uF	M. Local			0.20	0.20
1	Condensador 4700 uF	M. Local			0.20	0.20
2	Condensador de 100 nF	M. Local			0.10	0.20
2	Condensador 1 uF	M. Local			0.10	0.20
1	PCB fibra de vidrio 30cm ²	M. Local		\$10.80	33.16	33.16
1	Molex 2 pines	M. Local			0.30	0.30
					Total	177.84

Tabla 4.9: Costo de los componentes de la fuente de alimentación

(Fuente: Elaboración propia)

Can	Componentes	Fabricante	Precio USA	Precio Perú	Precio S/.	Total S/.
1	FTD232BM USB UART Serial	Digi-Key	\$4.95	\$9.90	30.40	30.40
1	Regulador LM317T	M. Local			1.00	1.00
1	Módulo XBee-Pro W/U FL ANT	Digi-Key	\$36.65	\$73.30	225.03	225.03
1	Potenciómetro de precisión 20K	M. Local			2.00	2.00
2	Condensador cerámico 1uF	M. Local			0.10	0.20
3	Condensador electrolítico 1uF	M. Local			0.10	0.30
3	Led	M. Local			0.10	0.30
3	Resistencia 1K	M. Local			0.10	0.30
3	Resistencia 10K	M. Local			0.10	0.30
1	Resistencia 20K	M. Local			0.10	0.10
3	Resistencia 330	M. Local			0.10	0.30
3	Resistencia 470	M Local			0.10	0.30
1	Oscilador 16MHz	M Local			2.00	2.00
1	Conector USB	M. Local			1.00	1.00
1	PCB fibra de vidrio 20 cm ²	M Local		\$7.20	22.10	22.10
					Total	285.63

Tabla 4.10: Costo de los equipos y materiales de la estación base
(Fuente: Elaboración propia)

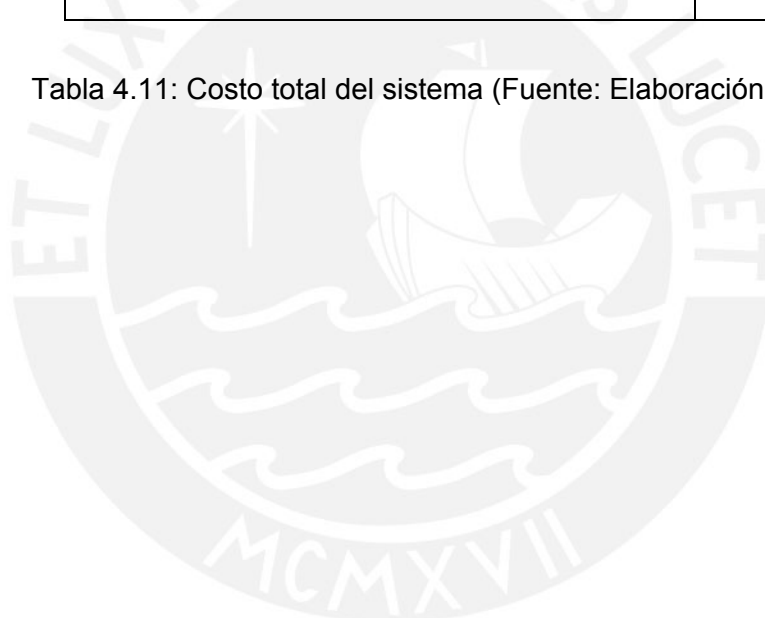
4.7.2 Presupuesto total

Para hallar los costos totales que se derivan de la automatización del sistema de monitoreo de la Planta Acuícola PUCP, se debe considerar no sólo los costos por el hardware utilizado, sino también los costos por el software y la instalación de la red inalámbrica por parte del personal calificado.

En la tabla 4.11 se muestran estos costos derivados, y el costo total del sistema. Se observa que el costo de implementación es alto debido al uso de dispositivos ZigBee que son adquiridos e importados a un precio elevado, se hace notar que este costo se viene reduciendo rápidamente debido a su gran difusión. Esto permite garantizar que la red inalámbrica será accesible a los usuarios demandantes de tecnología que no cuentan con grandes recursos económicos, en un tiempo relativamente corto.

Cantidad	Componentes	Precio S/.	TotalS/.
HARDWARE			
4	Nodo remoto	213.20	852.80
1	Nodo coordinador	311.99	311.99
1	Estación base	285.63	285.63
1	Fuente de alimentación	177.84	177.84
-		Total 1	1628.26
PERSONAL			
144	Horas de Ingeniero	46.05	6631.20
		Total 2	6631.20
		COSTO TOTAL	8259.46

Tabla 4.11: Costo total del sistema (Fuente: Elaboración propia)

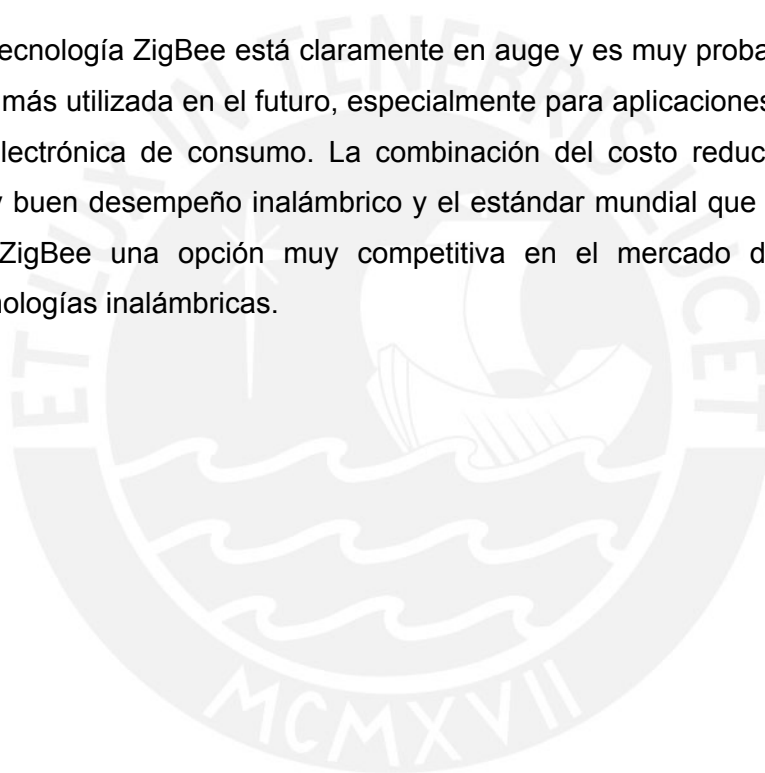


CONCLUSIONES

1. En esta investigación se obtiene el diseño de una red de sensores inalámbrica que encaja de manera ideal en el monitoreo de la calidad del agua de los tanques de cultivo de Tilapia, ya que permite el acceso en tiempo real a información confiable de los parámetros críticos como la temperatura, el oxígeno disuelto, concentraciones de CO₂ y niveles de pH. Lo cual servirá para estudiar cómo responde el cultivo de Tilapia frente a las variaciones de las condiciones físico-químicas del agua, durante la etapa de engorde.
2. Los resultados obtenidos durante las pruebas de *loopback* y cobertura de la red inalámbrica donde se observa una adecuada potencia de recepción y una tasa de paquetes errados (PER) menor al 1%, permiten garantizar la calidad del enlace y la fiabilidad de la comunicación cursada entre los diferentes nodos de la red ubicados dentro de los ambientes donde van a ser distribuidos.
3. La simulación del funcionamiento de la red inalámbrica, utilizando los circuitos de prueba construidos en base al diseño propuesto, garantiza que la red operará sin inconvenientes y cumpliendo con el adecuado protocolo de comunicaciones que permite un sistema confiable y seguro. Para esto se realizó la transmisión de información analógica y digital, donde los paquetes enviados por los nodos remotos, el nodo coordinador y la estación base se forman con el formato de la trama ZigBee.
4. El módulo XBee/Xbee-Pro es un dispositivo de fácil acceso para aplicaciones ZigBee, mediante el cual se puede realizar la transmisión de señales analógicas y/o digitales conectadas directamente a sus pines de entrada/salida o al microcontrolador asociado con el cual interactúa para realizar funciones de procesamiento y almacenamiento de los datos. Los resultados de la investigación demuestran claramente que ZigBee y en particular XBee tienen todo el potencial de satisfacer todos los requerimientos descritos para realizar el diseño de una red inalámbrica en la planta acuícola.
5. Las mediciones y el diseño de la red inalámbrica se hicieron a nivel físico determinando así la mejor ubicación de los equipos inalámbricos, sólo se tomaron en cuenta parámetros físicos como por ejemplo la conectividad, potencia de recepción y la fiabilidad de la comunicación midiendo la tasa de

paquetes errados (PER). Pero no se midieron la velocidad de transmisión, ancho de banda, ni el tráfico generado, ya que las características de la red muestran que se trabaja con una baja tasa de muestreo y transmisión de datos.

6. Para el pabellón de Electrónica, Informática y Telecomunicaciones, el diseño de la red dio como resultado que la estación base debe estar ubicada entre el pasillo y las oficinas de profesores, para obtener una buena cobertura y potencia de recepción. Esto se debe a que el pabellón se encuentra dividido en muchos ambientes entre los cuales hay oficinas y laboratorios, donde se tienen mayores elementos de atenuación de la señal inalámbrica.
7. La tecnología ZigBee está claramente en auge y es muy probable que sea cada vez más utilizada en el futuro, especialmente para aplicaciones industriales y de la electrónica de consumo. La combinación del costo reducido de hardware, muy buen desempeño inalámbrico y el estándar mundial que lo soporta, hacen de ZigBee una opción muy competitiva en el mercado de fabricantes de tecnologías inalámbricas.



RECOMENDACIONES

1. Se recomienda la investigación y el desarrollo de aplicaciones diferentes al monitoreo de la calidad del agua, con el uso de la tecnología inalámbrica ZigBee. Así como también la adición de actuadores para permitir la administración y manipulación de los dispositivos, lo cual ofrece grandes oportunidades para muchas aplicaciones y aumenta las capacidades de la red.
2. El sistema de monitoreo de parámetros está diseñado de tal manera que se puedan mejorar las funciones que se tienen o aumentar funciones a las ya existentes. De esta manera se recomienda la incorporación de sistemas de control, para obtener un sistema realimentado que permita automatizar la planta estableciendo algún tipo de control.
3. Se recomienda realizar la capacitación del personal que labora en la planta acuícola para el análisis de la información adquirida con el sistema de monitoreo propuesto, debido a que los acuicultores no están acostumbrados a manejar grandes cantidades de información durante los proceso de cultivo. Esto será importante para lograr que el centro acuícola obtenga los mayores beneficios con la utilización de esta tecnología.

FUENTES

- [1] MINISTERIO DE LA PRODUCCIÓN
2005 La acuicultura en el Perú. [En línea] [Consultado 2007/11/10]
<<http://www.produce.gob.pe/produce/presentaciones/index.php>>
- [2] MINISTERIO DE LA PRODUCCIÓN
2006 Panorama y potencial de la acuicultura peruana. [En línea][Consultado 2007/08/12]
<<ftp://ftp.produce.gob.pe/produce/dna/Panorama.Acuicultura.pdf>>
- [3] FONDEPES
2006 Perfiles económicos en acuicultura. [En línea] [Consultado 2007/09/13]
<<http://www.produce.gob.pe/fondepes/acuicultura/proyectoacui.pdf>>
- [4] MINISTERIO DE LA PRODUCCIÓN
2007 Medidas promocionales para el desarrollo de la acuicultura. [En línea] [Consultado 2007/09/14]
<<ftp://ftp.produce.gob.pe/produce/dna/medidas.pdf>>
- [5] REAL ACADEMIA ESPAÑOLA
2008 Diccionario de la lengua española. Vigésima segunda edición. [En línea] [Consultado 2008/08/29]
<<http://www.rae.es/rae.html>>
- [6] CISESE
2008 Acuicultura. [En línea] [Consultado 2008/07/11]
<<http://acuicultura.cicese.mx/>>
- [7] CASTILLO, S., GALVEZ, J.I.
2006 Introducción al cultivo de Tilapia. [En línea] [Consultado 2008/07/11]
<<http://ag.arizona.edu/azaqua/AquacultureTIES/publications/Spanish%20W HAP/TIL1%20Intro%20Tilapia.pdf>>
- [8] COLT, Jhon.
2005 Water quality requirements for reuse systems. Aquacultural Engineering 34:143-156, USA. [Consultado 2007/10/11]
- [9] WHURTS W.A., DURBORROW R.M.
1992 Interactions of pH, Carbon Dioxide, Alkalinity and Hardness in Fish Ponds. Southern Regional Aquiculture Center 464:1-4, USA. [Consultado 2007/10/12]
- [10] MINISTERIO DE LA PRODUCCIÓN
2004 Cultivo de Tilapia. [En línea] [Consultado 2008/03/05]
<http://www.produce.gob.pe/mipe/dna/doc/ctilapia_1.pdf>

- [11] PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
2008 Mapa del Campus. [En línea] [Consultado 2008/08/07]
<www.pucp.edu.pe>
- [12] GOBIERNO REGIONAL DE JUNIN -PRODUCE.
2006 Criadero de Truchas Ingenio. [En línea] [Consultado 2006/01/12]
<www.regionjunin.gob.pe>
- [13] DIRECCIÓN REGIONAL DE PRODUCCIÓN JUNÍN-PRODUCE.
2006 Biólogo Rubén Sánchez. [Entrevista] [Consultado 2006/06/12]
- [14] TORRES PÉREZ, J.J.
2007 Diseño e implementación de un instrumento de medición de pH para la crianza de truchas. Tesis (ing.) PUCP. Facultad de Ciencias e Ingeniería PAGES. 5,6,7. [Consultado 2008/08/04]
- [15] MARLEY, Beem.
1998 Aquaculture: Realities and Potentials When Getting Started. Southern Regional Aquaculture Center 441:1-8, USA. [Consultado 2007/10/11]
- [16] EBELING, J. M., TIMMONS, M.B., BISOGNI, J.J.
2006 Review of Autotrophic and Heterotrophic Bacterial Control of Ammonia-nitrogen in Zero-exchange Production Systems: Stoichiometry and Experimental Verification. Aquaculture America 2006, February 13-16, Las Vegas, NV. [Consultado 2007/10/11]
- [17] ALCÓCER, Carlos
2000 Redes de Computadoras (2da ed.). INFOLINK, Lima. [Consultado 2008/01/08]
- [18] MAHGOUB, Imad., ILYAS, Mohammad.
2005 Sensor Networks Protocols. Boca Raton, FL : CRC Press. [Consultado 2007/11/18]
- [19] CIA
2007 Controller Area Network (CAN), an overview. [En línea] [Consultado 2007/10/12]
<<http://www.can-cia.org>>
- [20] FUNDACIÓN AUNA
2008 Tecnologías y actividades de estandarización para la interconexión de Home Networks. [En línea] [Consultado 2008/07/19]
<<http://www.fundacionorange.es/areas/historico/pdf/1.pdf>>
- [21] BLUETOOTH
2007 Compare con otras tecnologías. [En línea] [Consultado 2007/12/25]
<<http://spanish.bluetooth.com/Bluetooth/Technology/Works/Compare/>>
- [22] TSENG, Y., PAN, M.
2006 Quick Convergecast in ZigBee/IEEE 802.15.4 Tree-Based Wireless Sensor Network. 4th ACM international workshop 2006, October 02-06, Terromolinos, España. [Consultado 2007/09/17]
- [23] ILYAS, Mohammad., MAHGOUB, Imad.

- 2005 Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems. Boca Raton, FL : CRC Press. [Consultado 2007/10/22]
- [24] MIT Technology Review
2003 Emerging Technologies That Will Change the World. [En línea] [Consultado 2007/10/10]
<<http://www.technologyreview.com/Infotech/13060/?a=f>>
- [25] PANORAMA ACUÍCOLA
2007 Soluciones de monitoreo remoto inalámbrico para la acuicultura ofrece UnO Computerland Microcare. [En línea] [Consultado 2008/11/17]
<http://www.panoramaacuicola.com/noticia.php?art_clave=1145>
- [26] JIMÉNEZ, Manuel
2007 Redes de Comunicación de Datos y normas de sistemas Abiertos. [En línea] [Consultado 2008/09/15]
<http://www.dte.upct.es/personal/manuel.jimenez/docencia/GD6_Comunic_I nd/pdfs/Tema%201.pdf>
- [27] DACOSTA, Jacinto
2005 Comunicaciones Industriales. [En línea] [Consultado 2008/09/19]
<<http://www.lsi.uvigo.es/lsi/jdacosta/documentos/apuntes%20web/Topologia %20de%20redes.pdf>>
- [28] ZIGBEE ALLIANCE
2007 About the Alliance. [En línea] [Consultado 2008/06/15]
<<http://www.zigbee.org/en/about/>>
- [29] IEEE
2007 Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). [En línea] [consultado 2008/09/15]
<<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2006.pdf>>
- [30] DIGI
2008 802.15.4 and ZigBee. [En línea] [Consultado 2008/09/15]
<www.digi.com>
- [31] ZIGBEE ORG
2007 Especificación ZigBee. [En línea] [Consultado 2008/09/15]
<http://www.zigbee.org/en/spec_download/download_request.asp>
- [32] PUNTO EDÚ
2008 El boom de la trucha. [En línea] [Consultado 2008/09/15]
<<http://issuu.com/puntoedu/docs/puntoedu103/1>>
- [33] ZIGBEE ORG
2006 Certified ZigBee products table for Website. [En línea] [Consultado 2008/09/15]
<www.zigbee.org/imwp/idms/popups/pop_download.asp?ContentID=7692>
- [34] DIGI
2007 XBee™/XBee-PRO™ OEM RF Modules [En línea] [Consultado 2008/09/15]
<<http://www.digi.com/products/wireless/zigbee-mesh/>>

ANEXO 1

PRUEBA DE LOOPBACK

En la prueba de *loopback* se analiza principalmente el regreso de los datos, el hardware que se utiliza consiste de un maestro y un esclavo, cuando el maestro envía datos al esclavo, este los devuelve inmediatamente. En esta prueba se realizó la configuración para el envío de 1000 paquetes de datos a una tasa de 9600 baudios, la trama de datos creada fue de 24 bytes y el tiempo límite para considerar un paquete perdido se fue variando desde 0.5 ms hasta 1000 ms.

Los resultados se muestran en la tabla 1 y en las figuras siguientes se observa la información obtenida durante cada prueba realizada, como el número de paquetes perdidos, el número de máximo de paquetes perdidos y la potencia de recepción.

Prueba	Tiempo límite de recepción de datos	Paquetes enviados	Paquetes recibidos	Paquetes perdidos	RSSI promedio	PER
1	0.5 ms	1000	481	519	-46 dBm	51.90%
2	1 ms	1000	489	511	-55 dBm	51.10%
3	5 ms	1000	496	504	-55 dBm	50.40%
4	10 ms	1000	500	500	-57 dBm	50.00%
5	20 ms	1000	500	500	-46 dBm	50.00%
6	30 ms	1000	13	987	-48 dBm	98.70%
7	40 ms	1000	13	987	-48 dBm	98.70%
8	50 ms	1000	973	27	-57 dBm	2.70%
9	60 ms	1000	990	10	-44 dBm	1.00%
10	70 ms	1000	1000	0	-60 dBm	0.00%
11	100 ms	1000	1000	0	-57 dBm	0.00%
12	1000 ms	1000	1000	0	-55 dBm	0.00%

Tabla 1: Resultados de la prueba de *loopback*

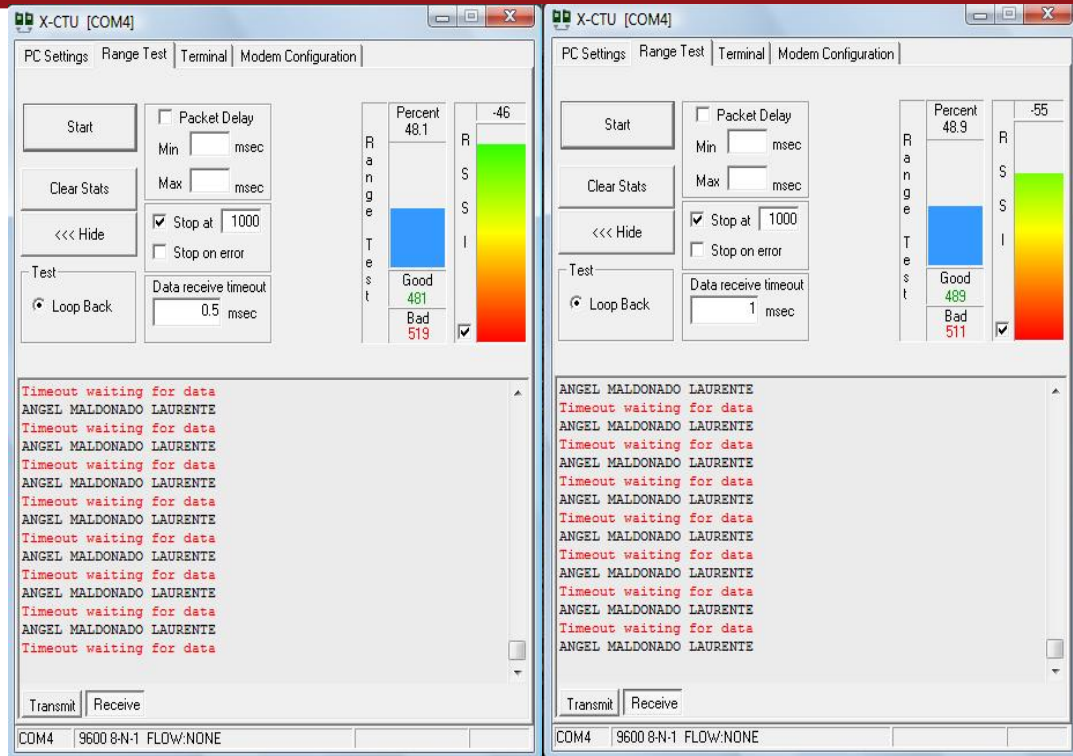


Figura 1

Prueba de *loopback* a 0.5 ms (izquierda) y 1 ms (derecha)

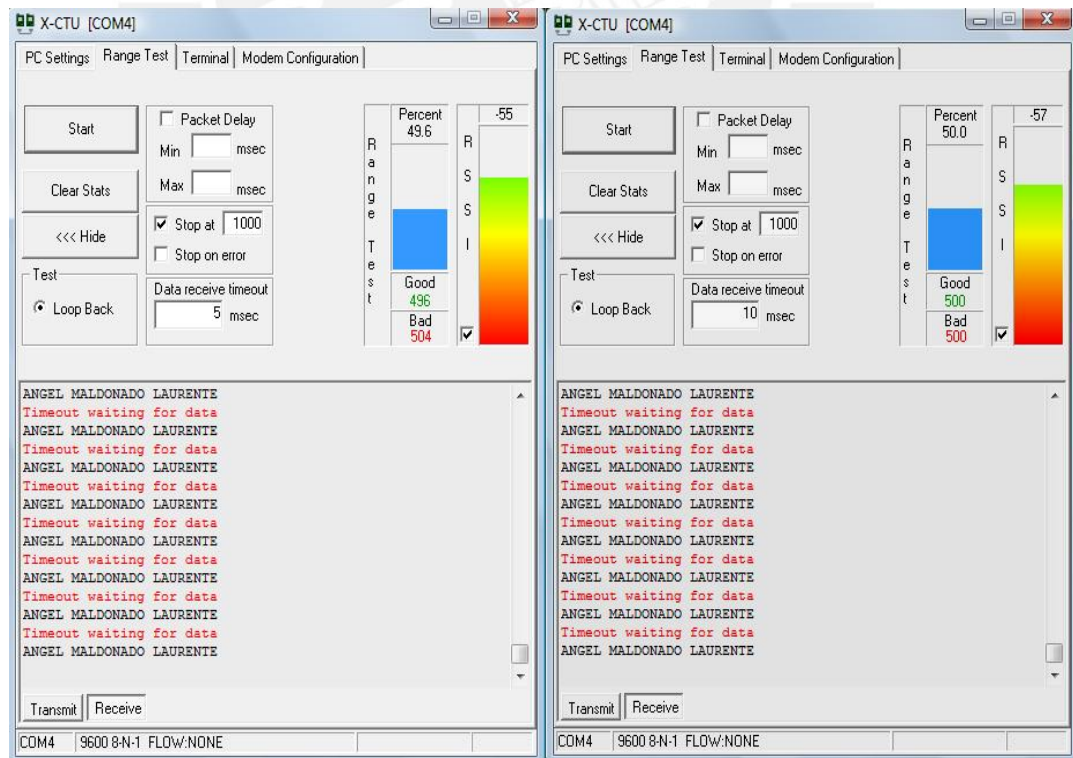


Figura 2

Prueba de *loopback* a 5 ms (izquierda) y 10 ms (derecha)

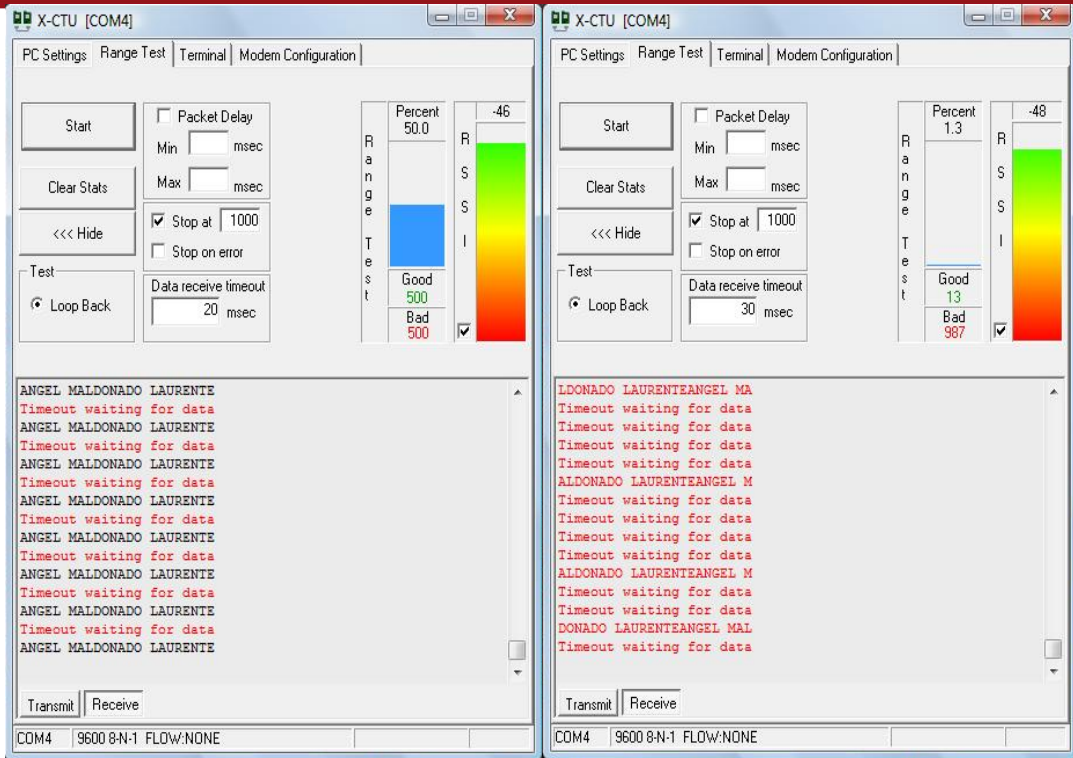


Figura 3

Prueba de *loopback* a 20 ms (izquierda) y 30 ms (derecha)

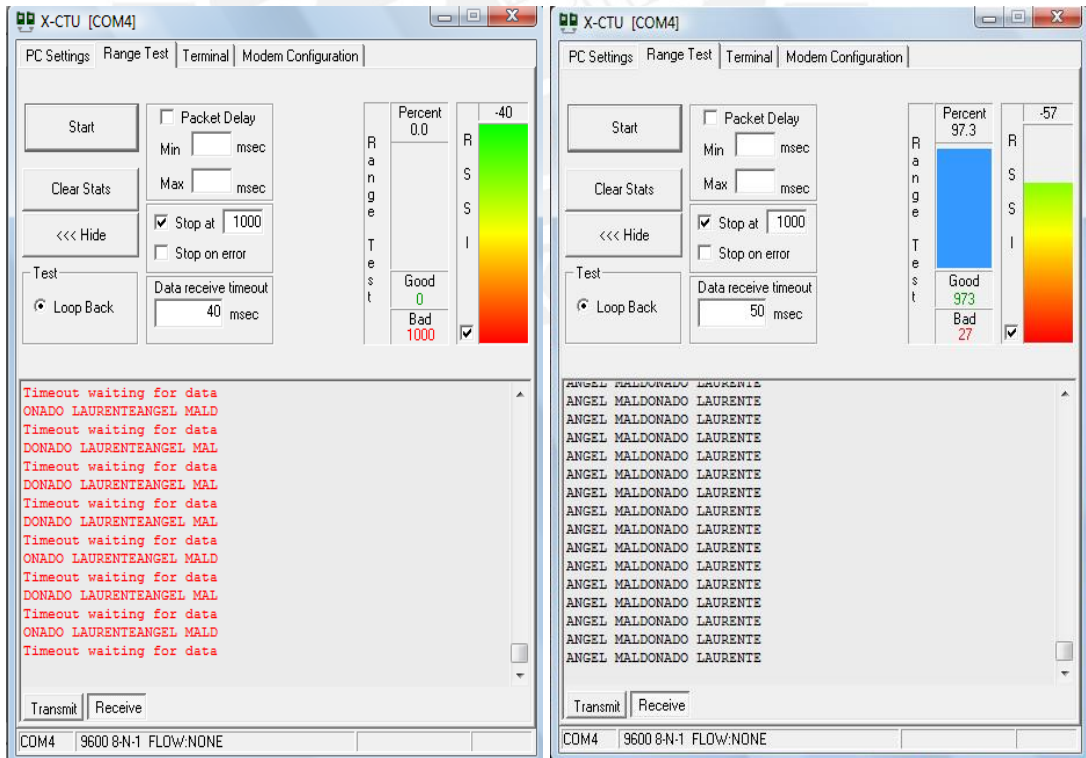


Figura 4

Prueba de *loopback* a 40 ms (izquierda) y 50 ms (derecha)

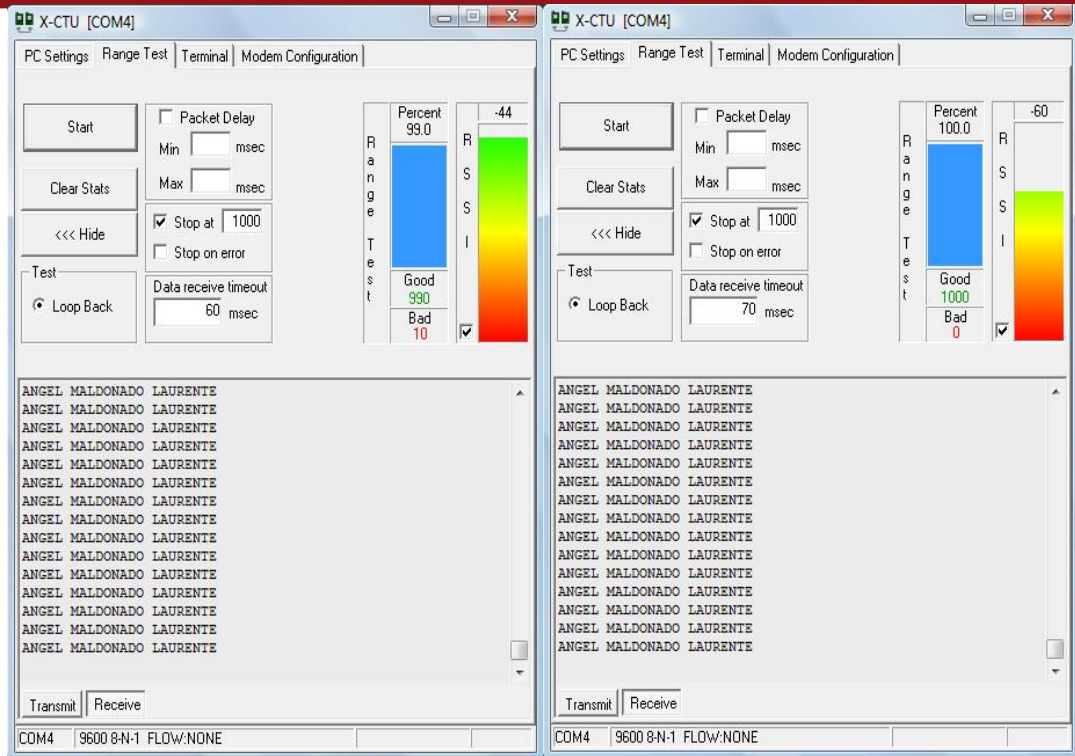


Figura 5

Prueba de *loopback* a 60 ms (izquierda) y 70 ms (derecha)

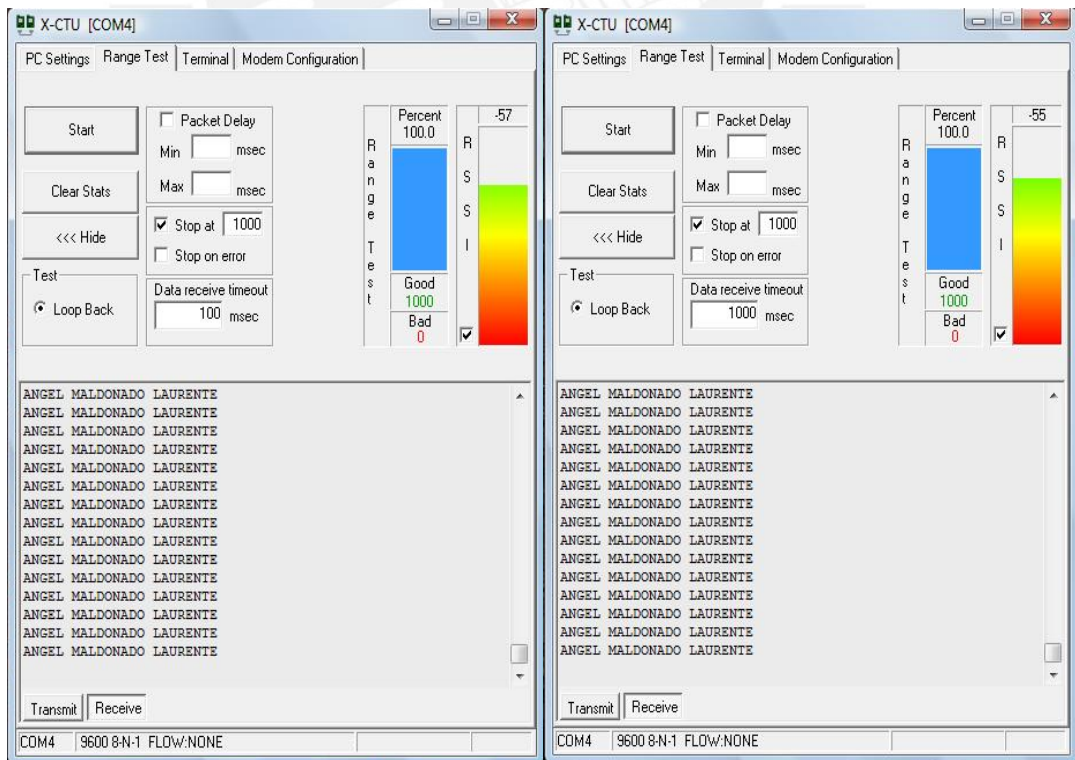


Figura 6

Prueba de *loopback* a 100 ms (izquierda) y 1000 ms (derecha)

ANEXO 2

PRUEBA DE COBERTURA

Durante la prueba de cobertura, se realizó la medición de la potencia de recepción entre el coordinador y la estación base ubicada en el pabellón de electrónica. Esta prueba se realizó el día 07 de agosto del año 2008, entre las 19.00 y 21.30 horas utilizando el software X-CTU.

En la tabla 2 y 3 se muestran los resultados obtenidos, y en las figuras siguientes se presentan las mediciones realizadas en los diferentes ambientes y laboratorios del pabellón de electrónica. En base a estos resultados se presenta en la figura 39 el mapa de cobertura de la red inalámbrica y la ubicación de la estación base.

Primer Piso								Segundo Piso	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-76	-76	-87	-92	-95	-90	-90	-93	-66	-90
-74	-75	-85	-92	-90	-89	-90	-90	-64	-89
-75	-76	-86	-92	-93	-90	-90	-92	-63	-90
Promedio de potencias de recepción									
1 Hall del primer piso frente a la planta.									
2 Almacén de Electrónica.									
3 Oficina de Jefatura de Proyectos.									
4 Laboratorio de Automatización.									
5 Laboratorio de Circuitos Analógicos.									
6 Servicios Higiénicos del primer piso.									
7 Escaleras del primer piso.									
8 Hall de entrada del primer piso.									
9 Hall del segundo piso frente a la planta.									
10 Hall de entrada, del segundo piso.									

Tabla 2: Potencias medidas en el primer y segundo piso del Pabellón de Electrónica

Tercer Piso										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
-63	-79	-79	-87	-82	-82	-77	-85	-84	-93	-90
-61	-77	-75	-82	-82	-79	-79	-82	-85	-90	-90
-62	-78	-77	-85	-82	-81	-78	-84	-85	-92	-90
Promedio de potencias de recepción										
Tercer Piso										
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
-86	-95	-85	-88	-93	-95	-95	-98	-82	-90	-98
-84	-93	-87	-86	-92	-88	-92	-98	-90	-90	-98
-85	-94	-86	-87	-93	-92	-94	-98	-86	-90	-98
Promedio de potencias de recepción										
1 Hall del tercer piso frente a la planta.										
2 Pasadizo entre las Oficinas de Profesores.										
3 Oficinas de Profesores.										
4 Sala de Servidores.										
5 Sala de Reuniones.										
6 Sala de Profesores.										
7 Entrada de vidrio, frente a la Recepción.										
8 Escalera central, frente a la Recepción.										
9 Lado izquierdo de la escalera central, frente a la Recepción.										
10 Recepción, frente al módulo de atención.										
11 Recepción.										
12 Sala de Fotocopiado, en la Recepción.										
13 Recepción, Secretaria de Electrónica.										
14 Recepción, Secretaria de Telecomunicaciones.										
15 Frente al Laboratorio de Desarrollo de Software.										
16 Laboratorio de Desarrollo de Software.										
17 Laboratorio de Desarrollo de Proyectos.										
18 Laboratorio de DSP.										
19 Laboratorio de Microelectrónica.										
20 Puerta de vidrio, del Hall de entrada.										
21 Escaleras del Hall de entrada.										
22 Servicios Higiénicos.										

Tabla 3: Potencias medidas en el tercer piso del Pabellón de Electrónica

PRIMER PISO

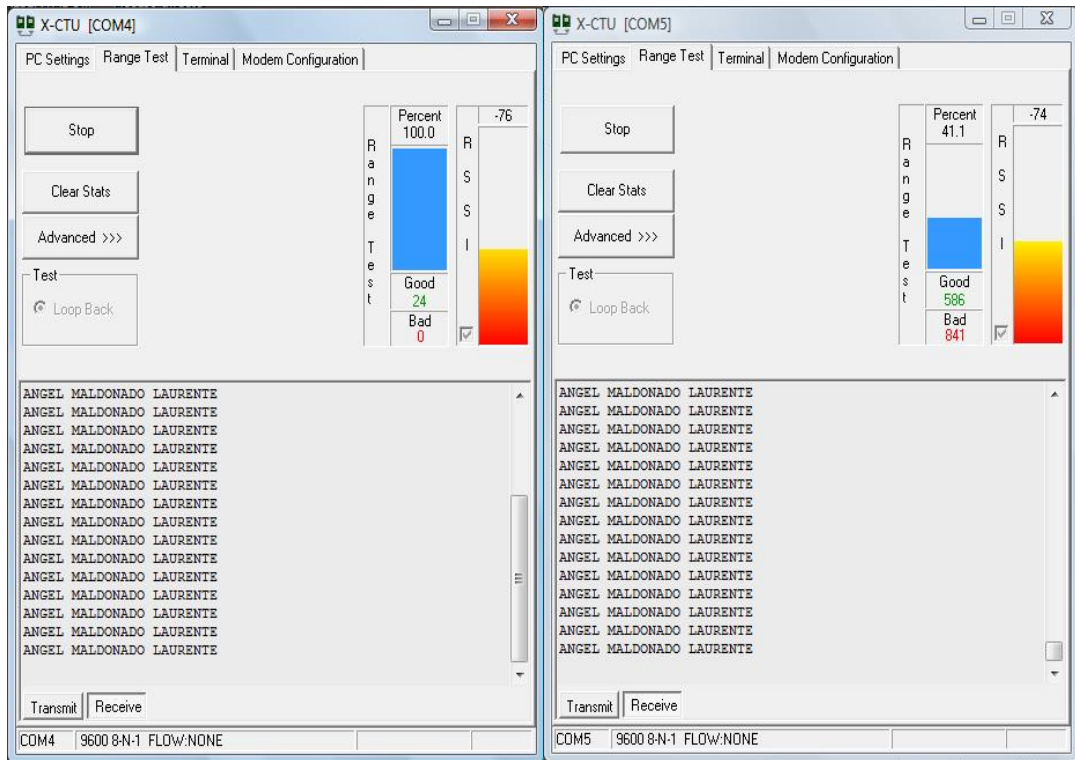


Figura 7: Potencia de recepción medida en el Hall del primer piso frente a la planta.

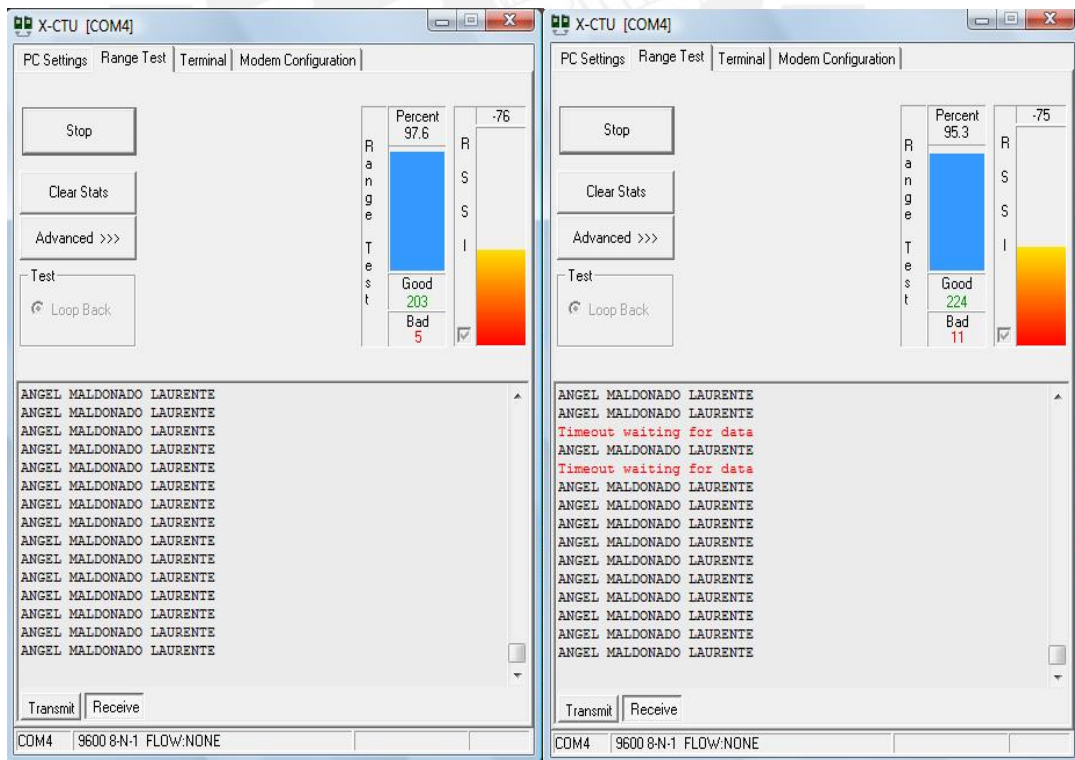


Figura 8: Potencia de recepción medida en el Almacén de Electrónica, del primer piso.

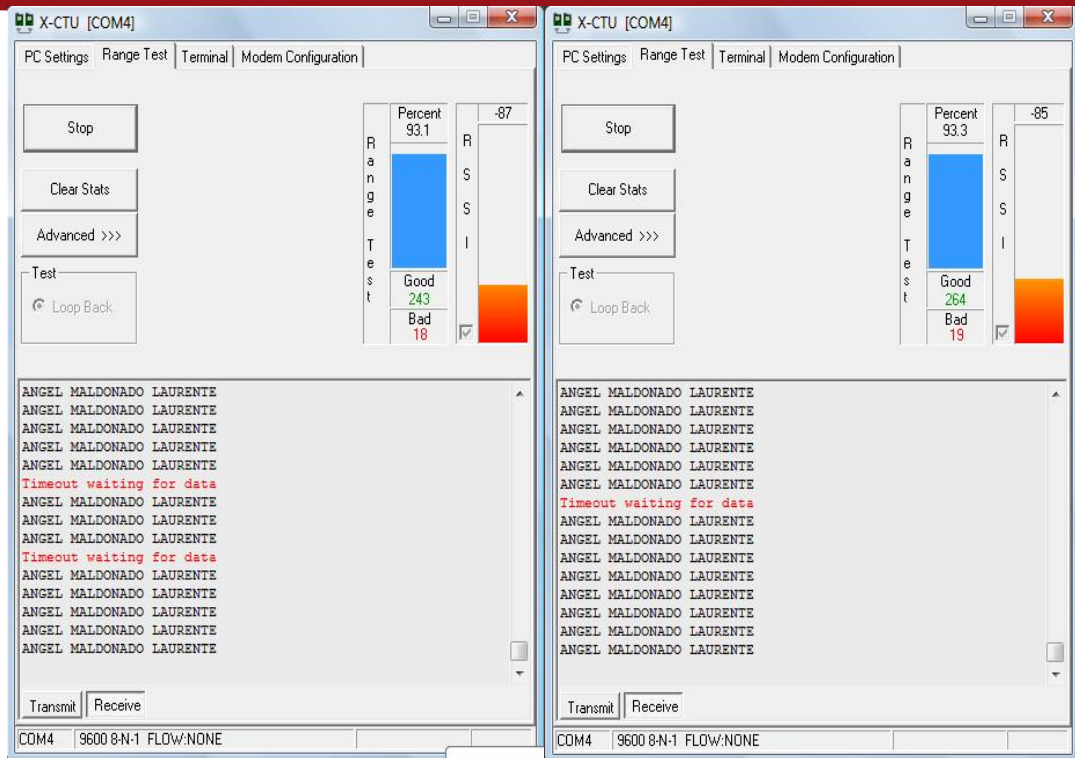


Figura 9: Potencia de recepción medida en la oficina de Jefatura de Proyectos, del primer piso.

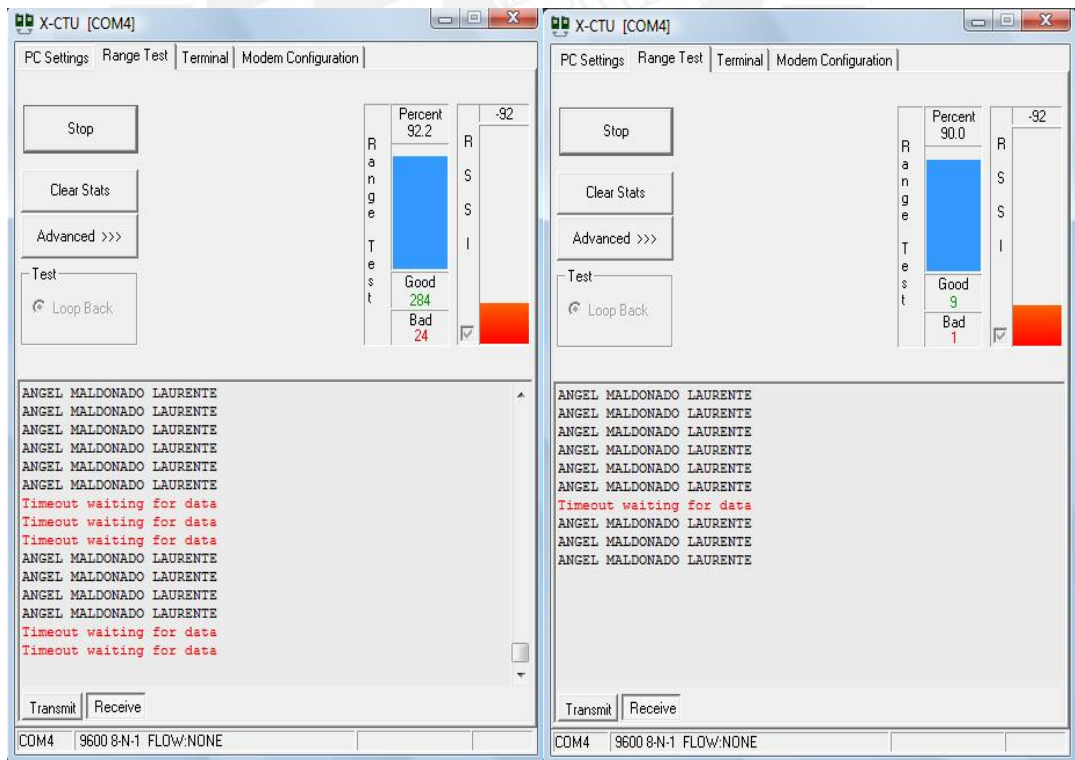


Figura 10: Potencia de recepción medida en el Laboratorio de Automatización, del primer piso.

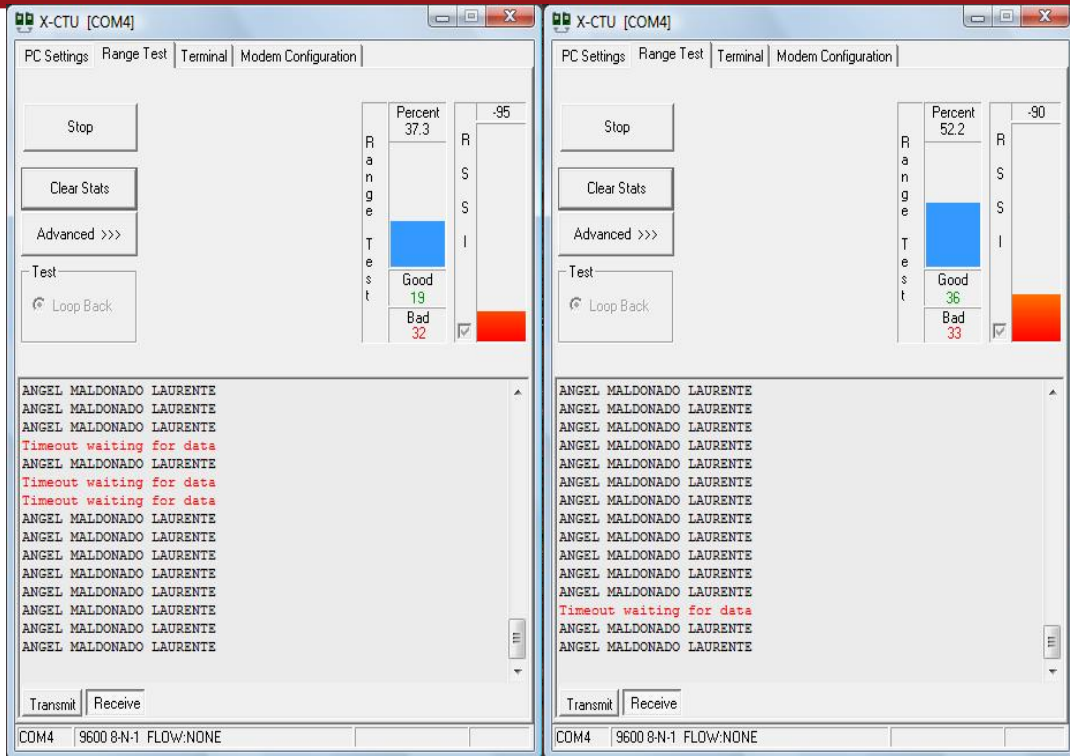


Figura 11: Potencia de recepción medida en el Laboratorio de Circuitos Analógicos, del primer piso.

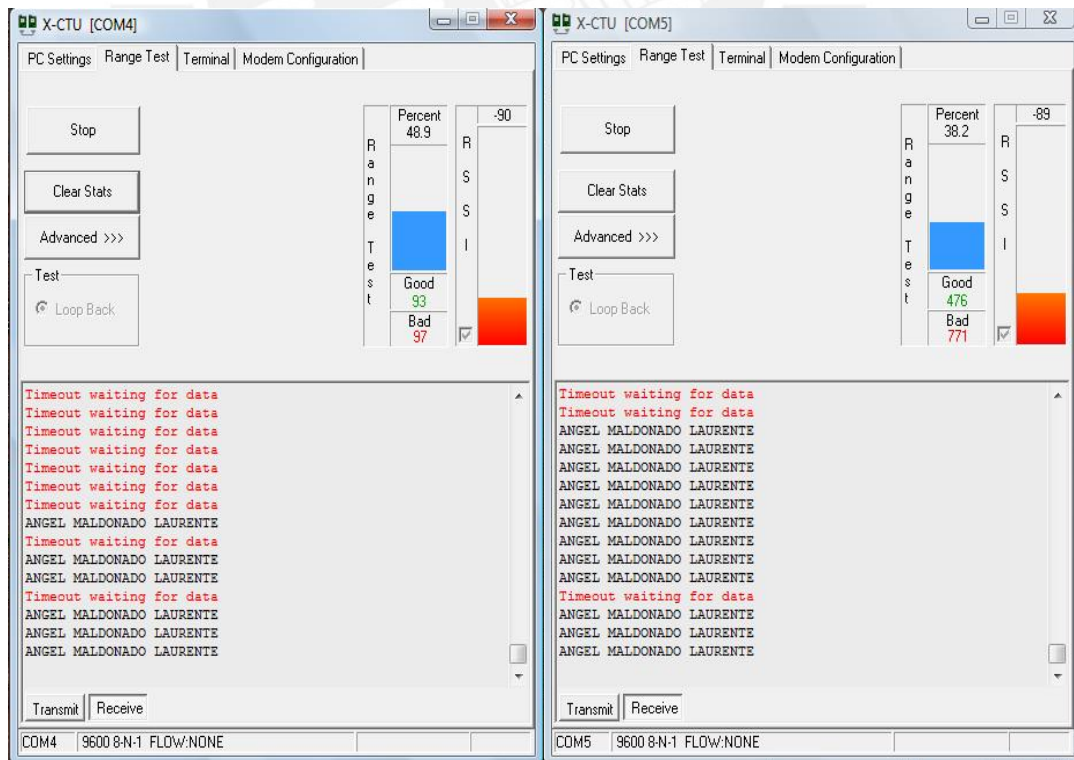


Figura 12: Potencia de recepción medida en los Servicios Higiénicos, del primer piso.

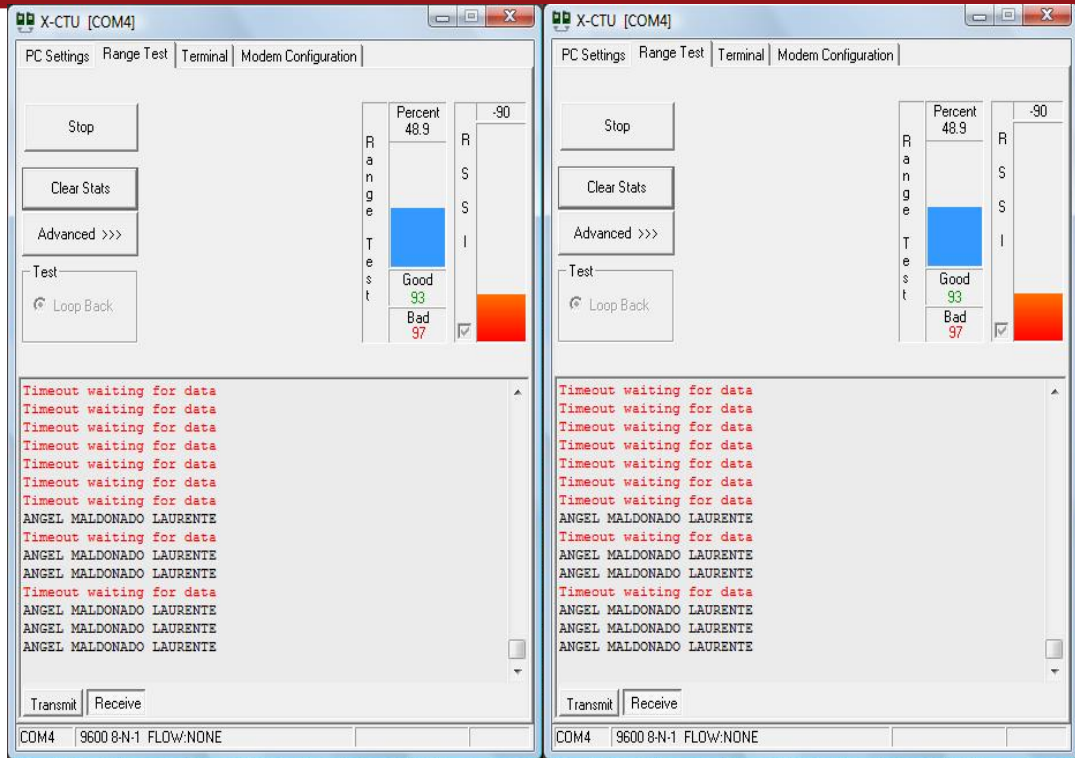


Figura 13: Potencia de recepción medida en las escaleras, del primer piso.

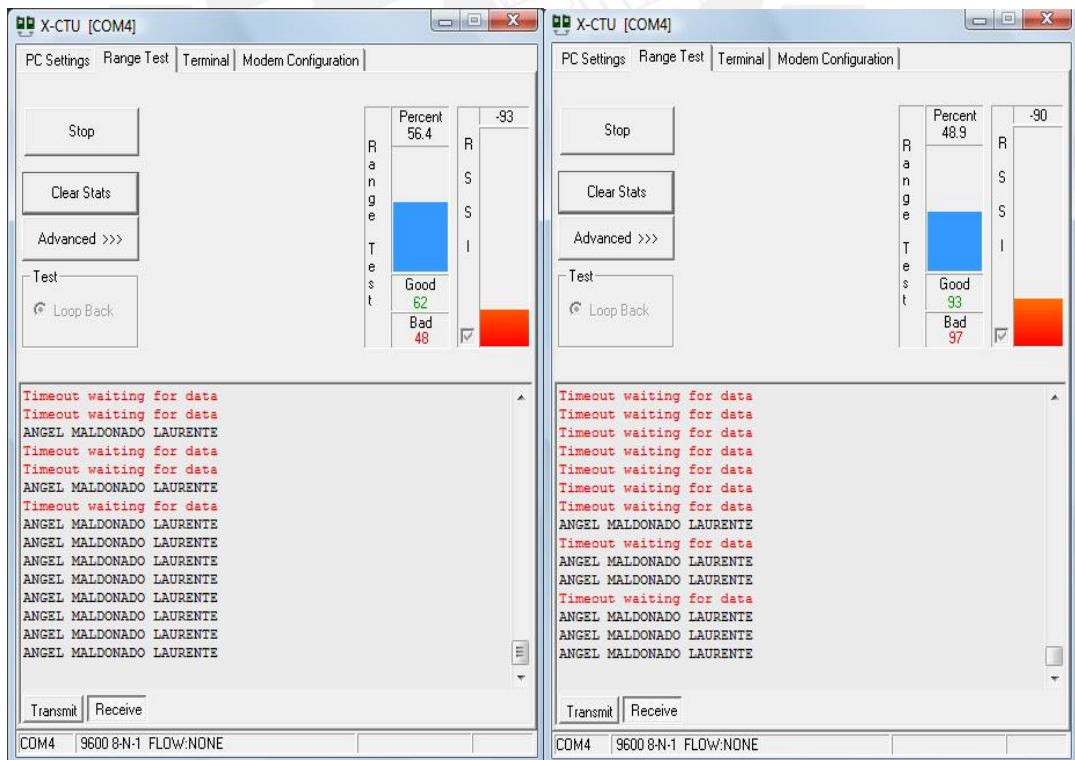


Figura 14: Potencia de recepción medida en el Hall de entrada, del primer piso.

SEGUNDO PISO

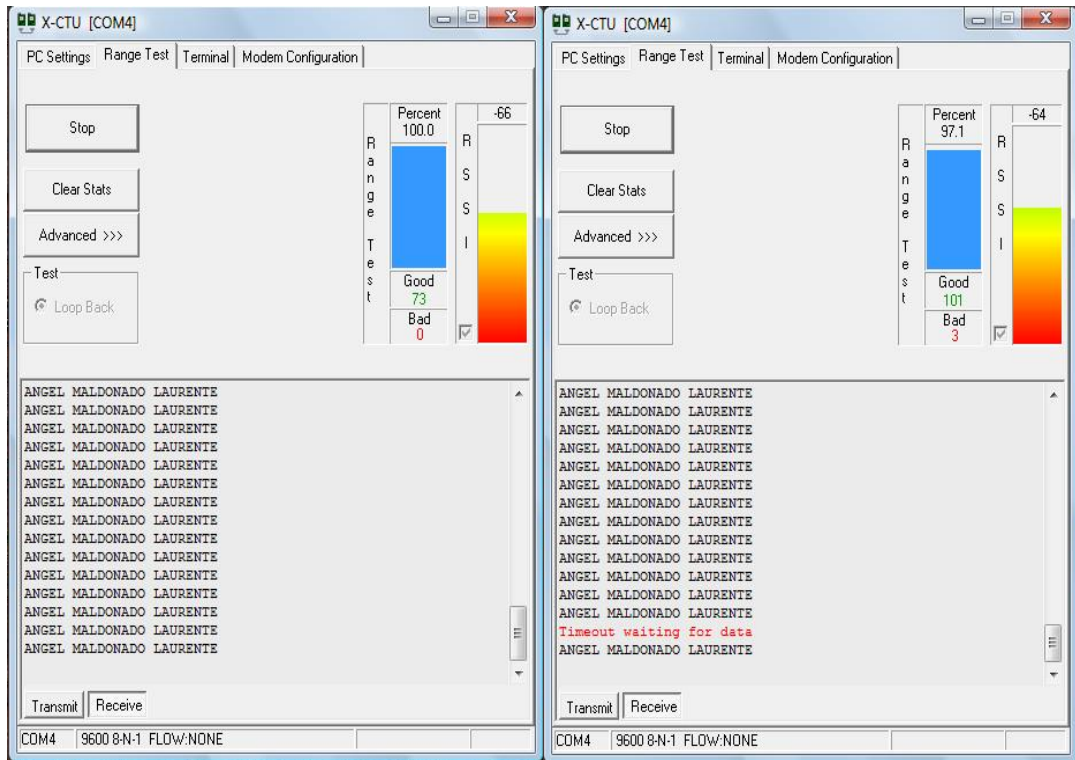


Figura 15: Potencia medida en el Hall del segundo piso frente a la planta.

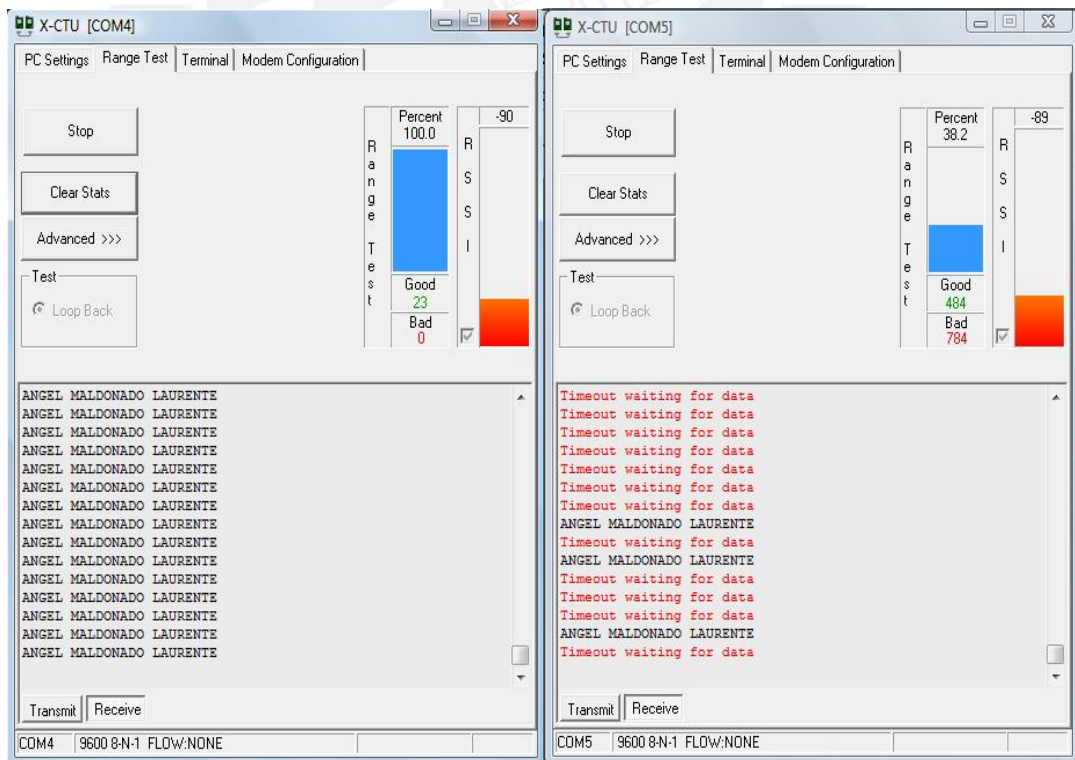


Figura 16: Potencia de recepción medida en el Hall de entrada, del segundo piso

TERCER PISO

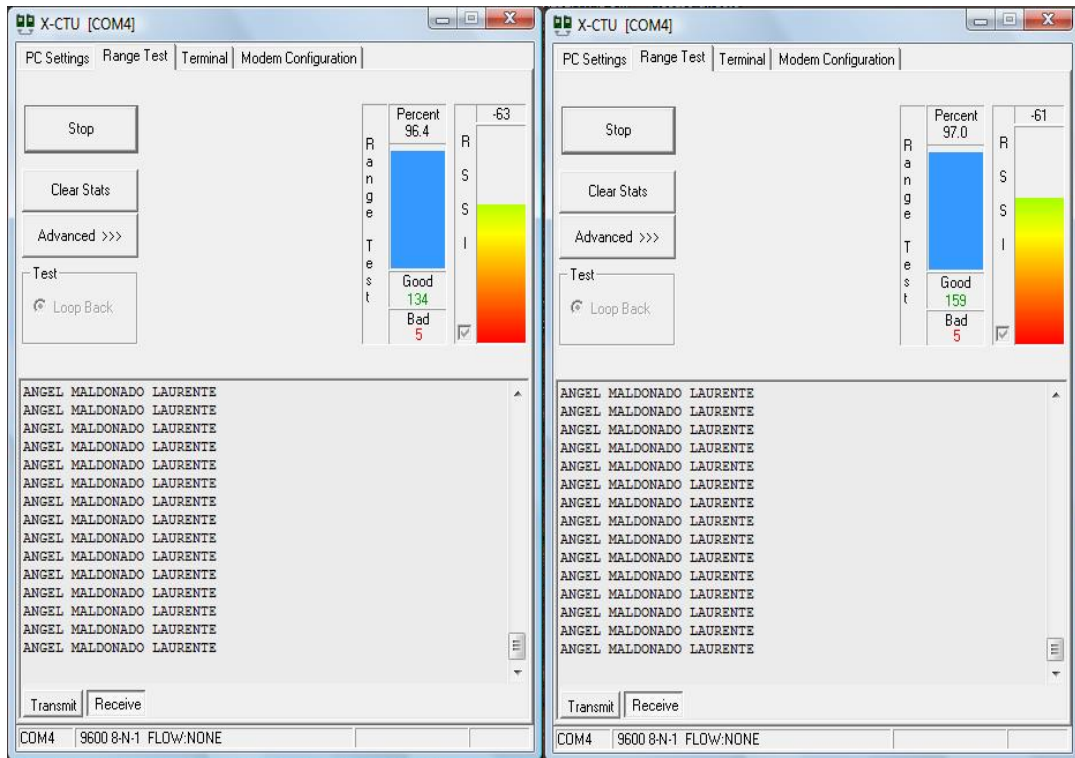


Figura 17: Potencia de recepción medida en el Hall frente a la planta. (Punto 1)

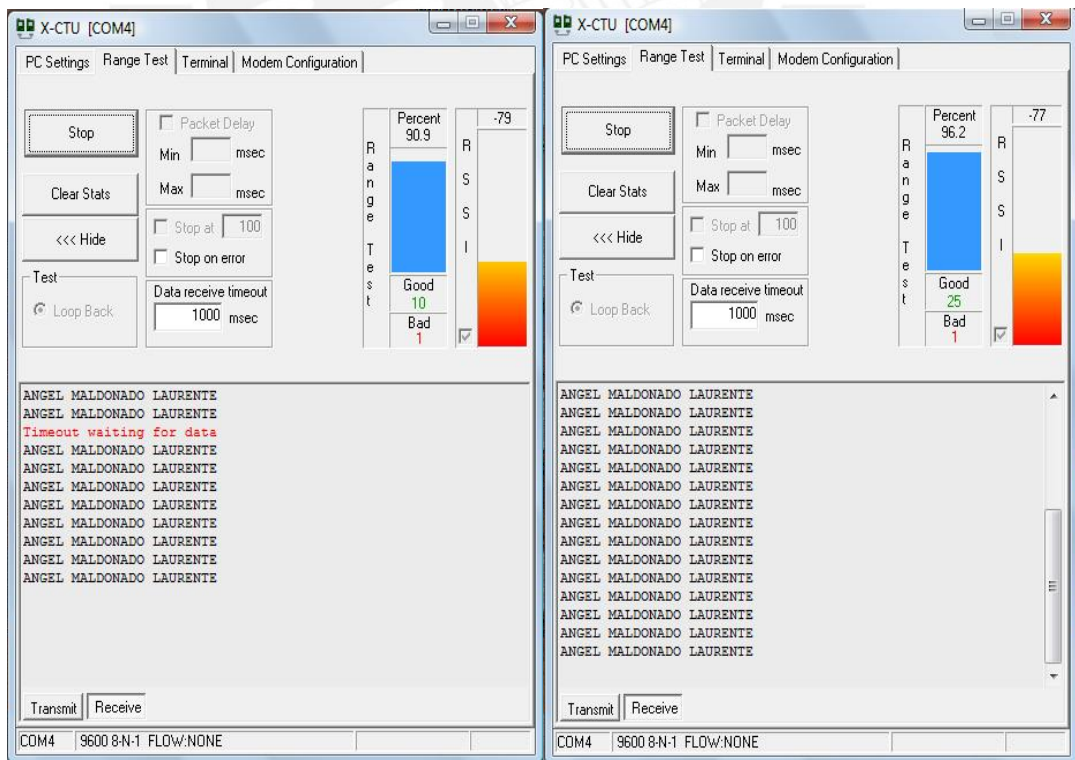


Figura 18: Potencia de recepción medida en el pasadizo, entre las Oficinas de Profesores. (Punto 2)

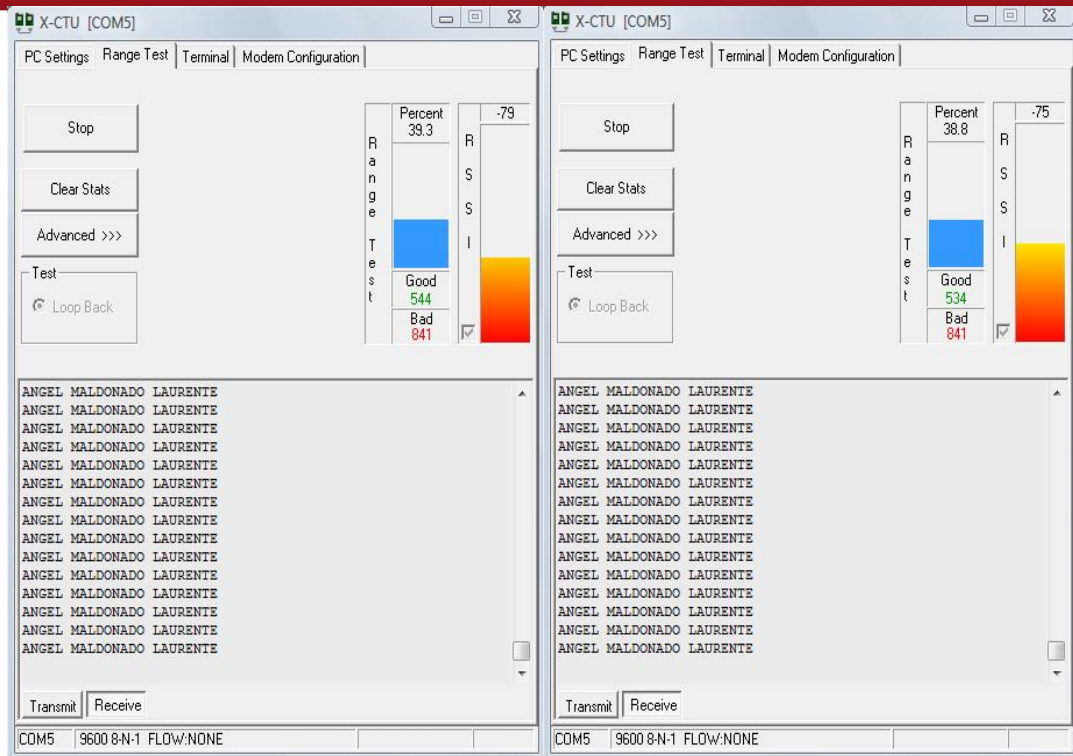


Figura 19: Potencia de recepción medida en las Oficinas de Profesores. (Punto 3)

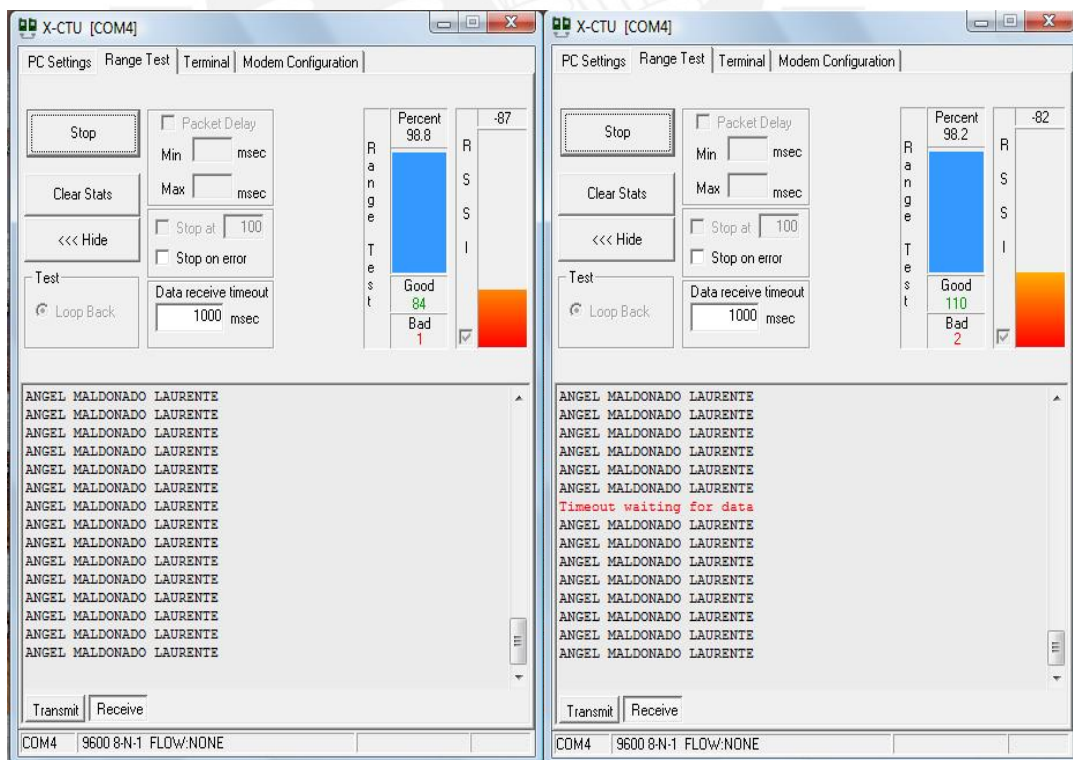


Figura 20: Potencia de recepción medida en la Sala de Servidores. (Punto 4).

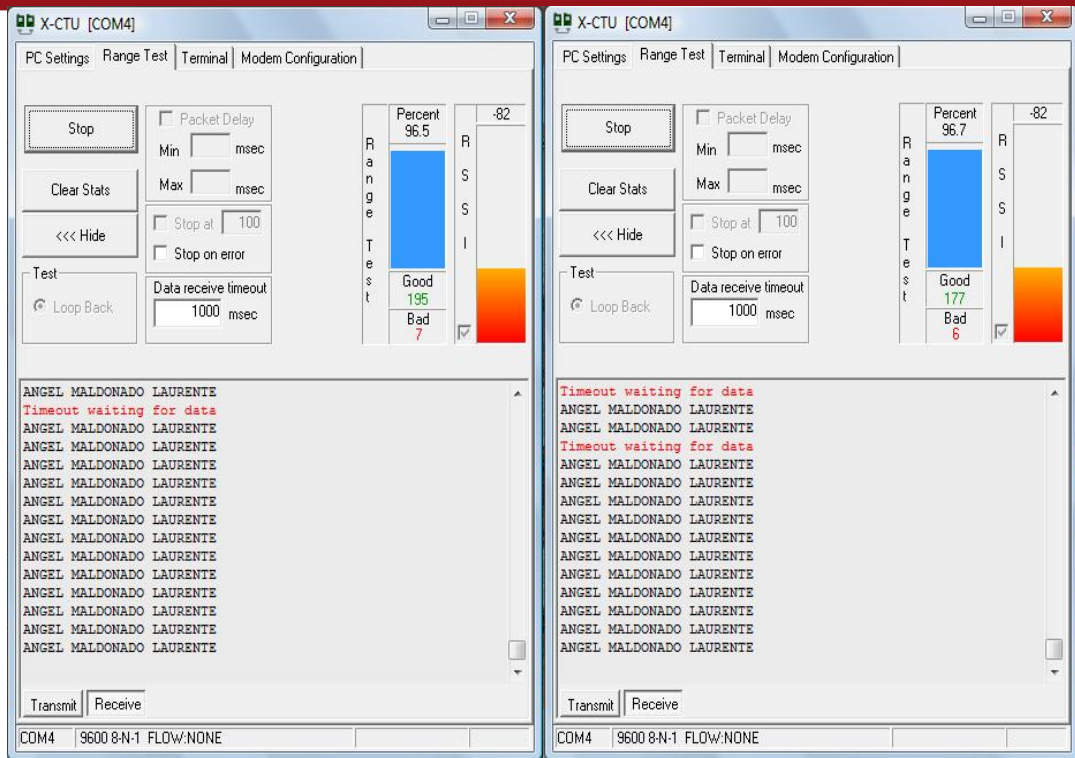


Figura 21: Potencia de recepción medida en la Sala de Reuniones. (Punto 5).

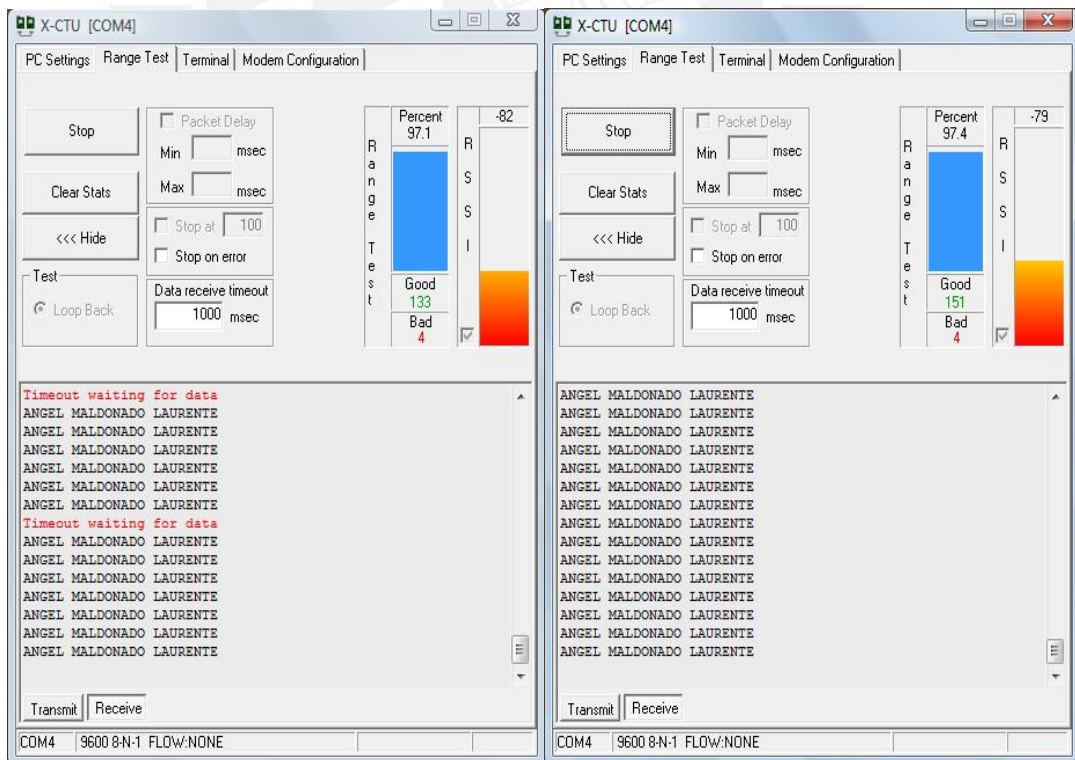


Figura 22: Potencia de recepción medida en la Sala de Profesores. (Punto 6).

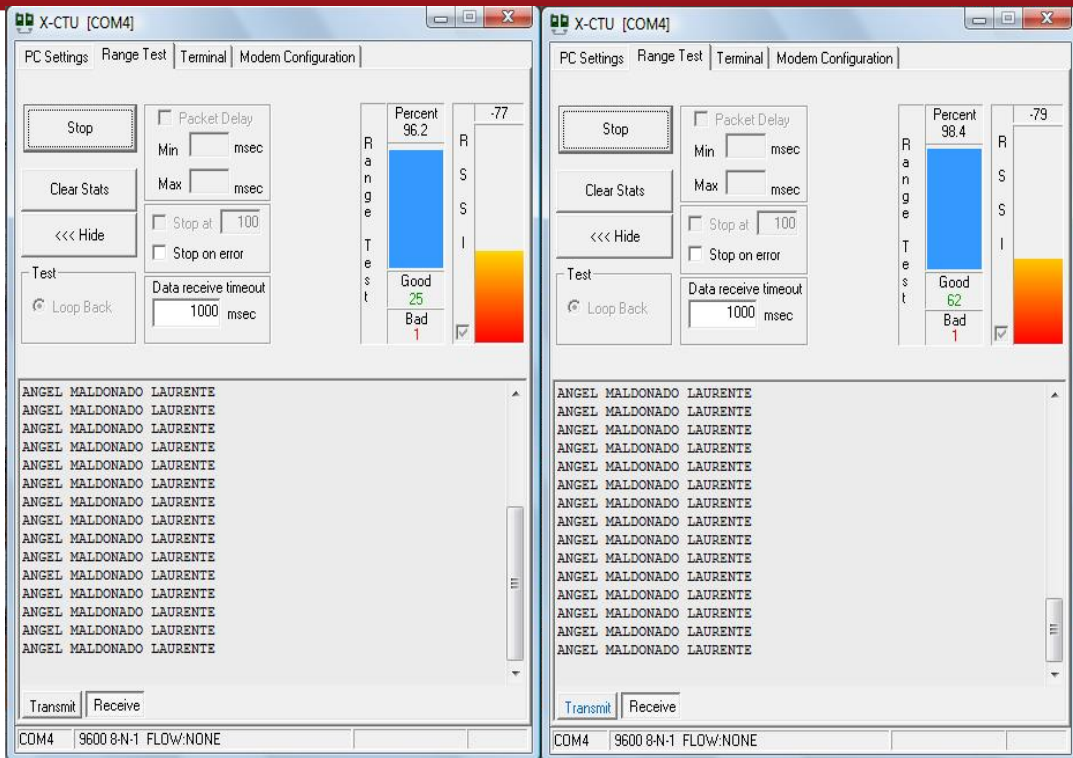


Figura 23: Potencia de recepción medida en la entrada de vidrio, frente a la Recepción. (Punto 7)

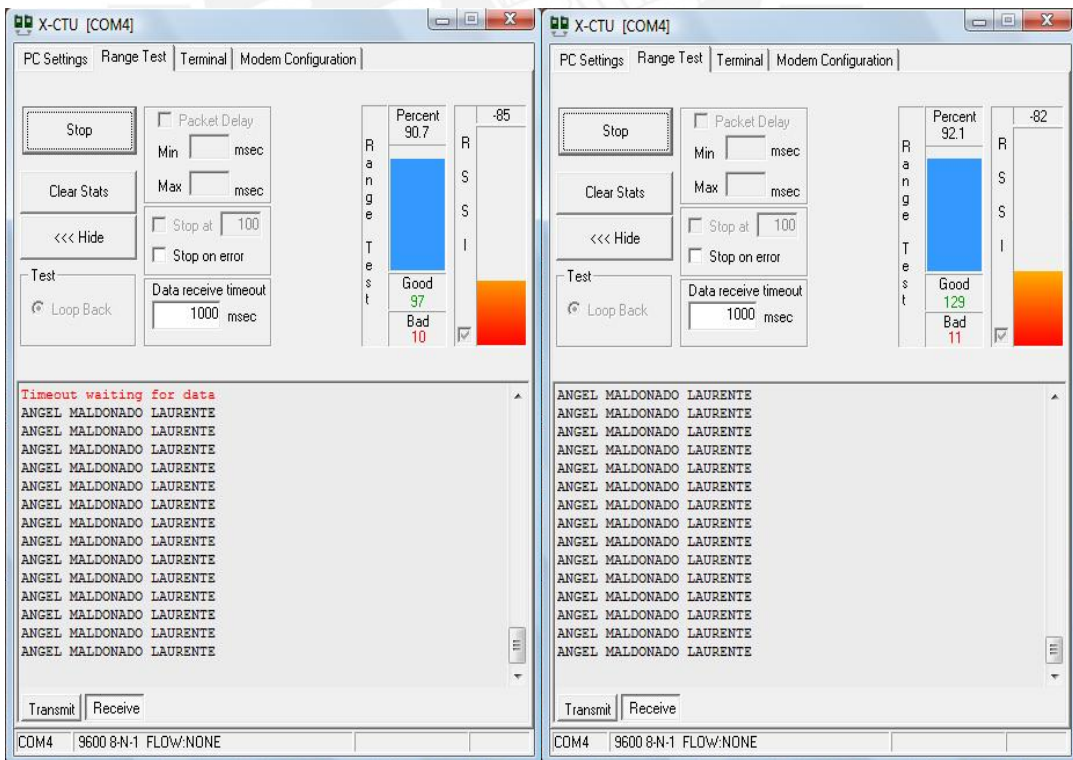


Figura 24: Potencia de recepción medida en la escalera central, frente a la Recepción. (Punto 8)

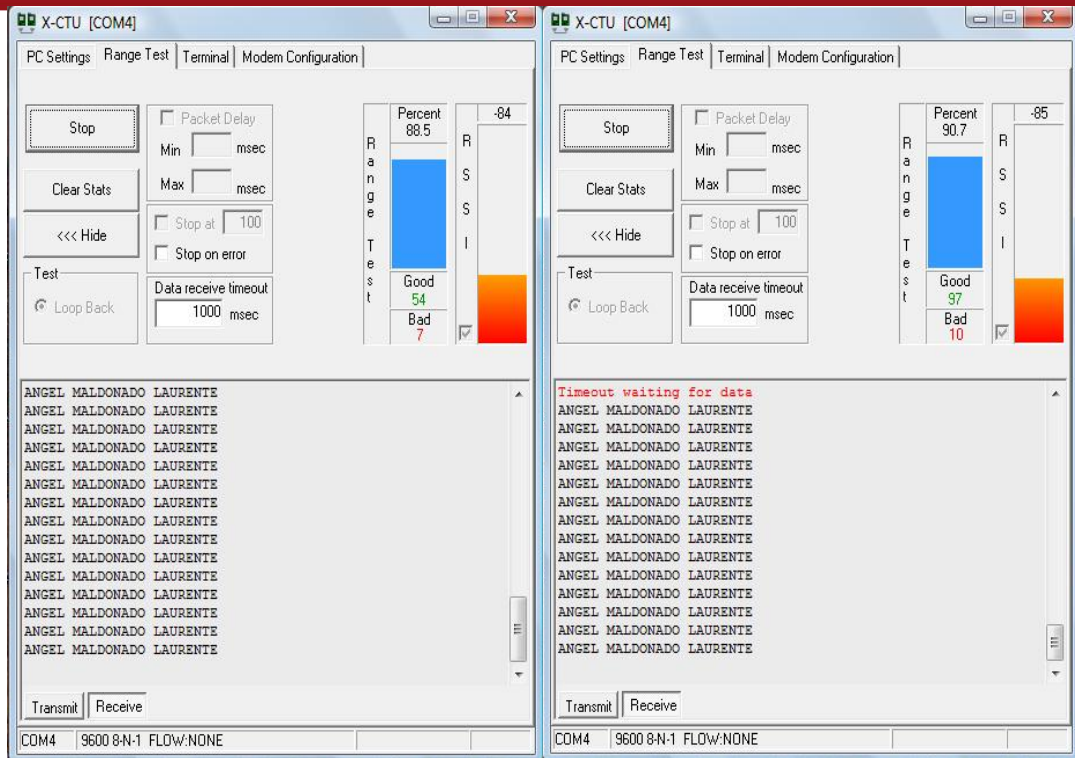


Figura 25: Potencia de recepción medida en el lado izquierdo de la escalera central, frente a la Recepción. (Punto 9)

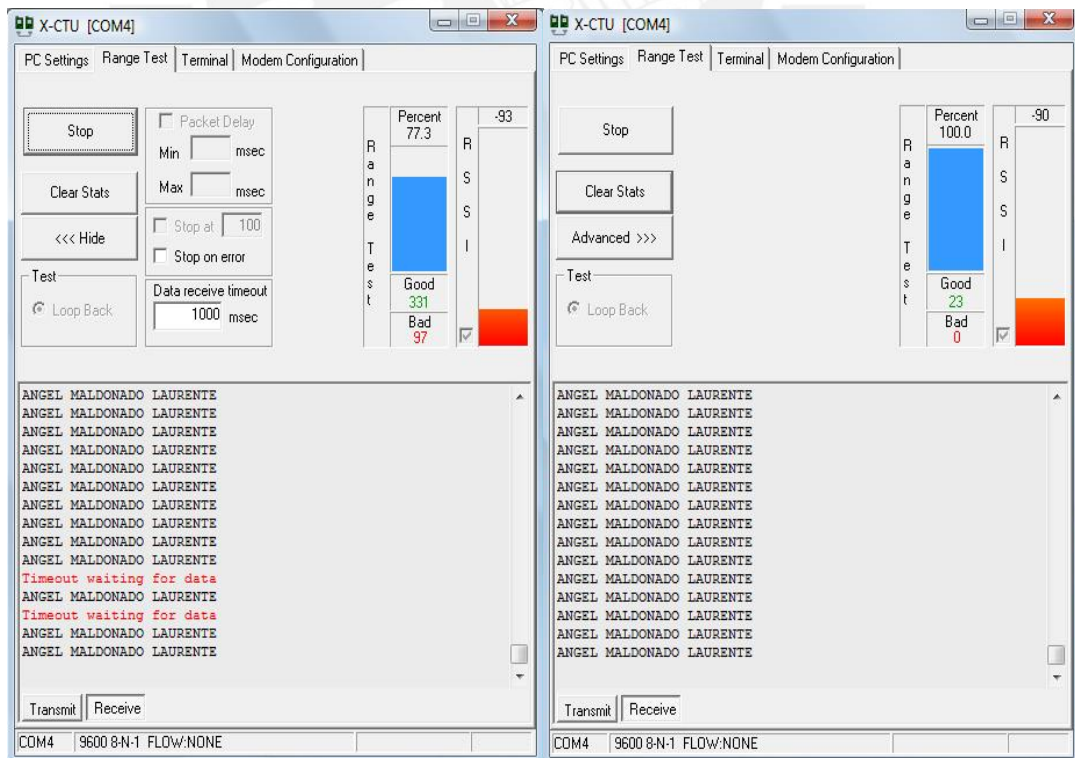


Figura 26: Potencia de recepción medida en la Recepción, frente al módulo de atención. (Punto 10)

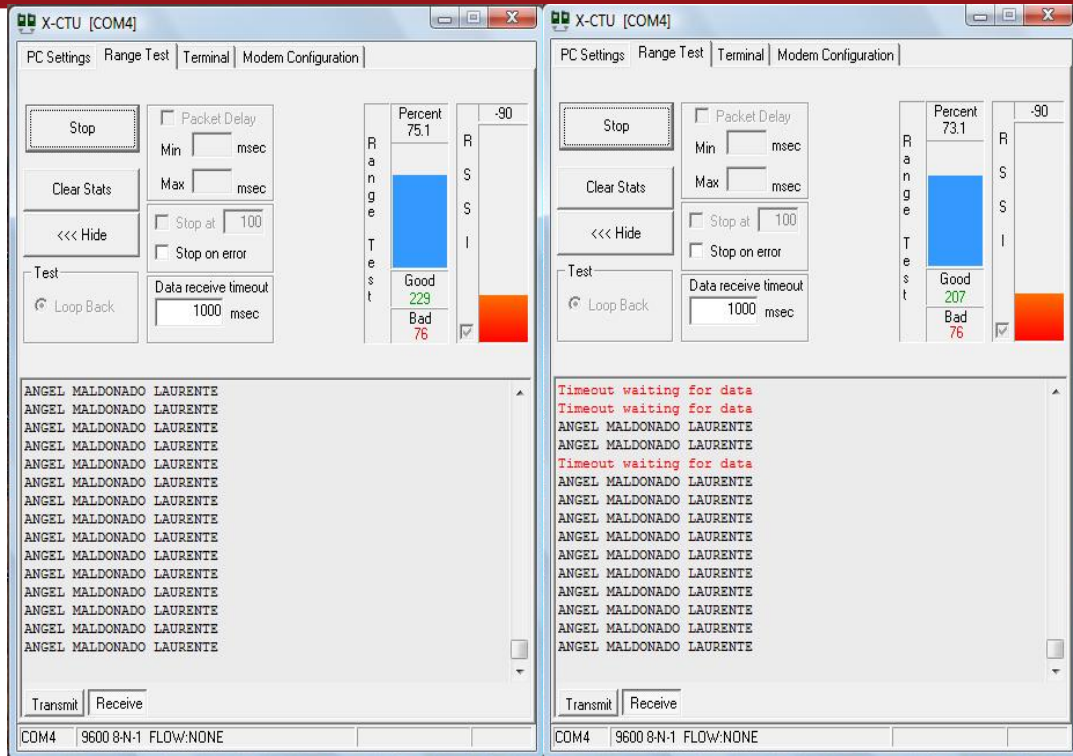


Figura 27: Potencia de recepción medida en la Recepción. (Punto 11)

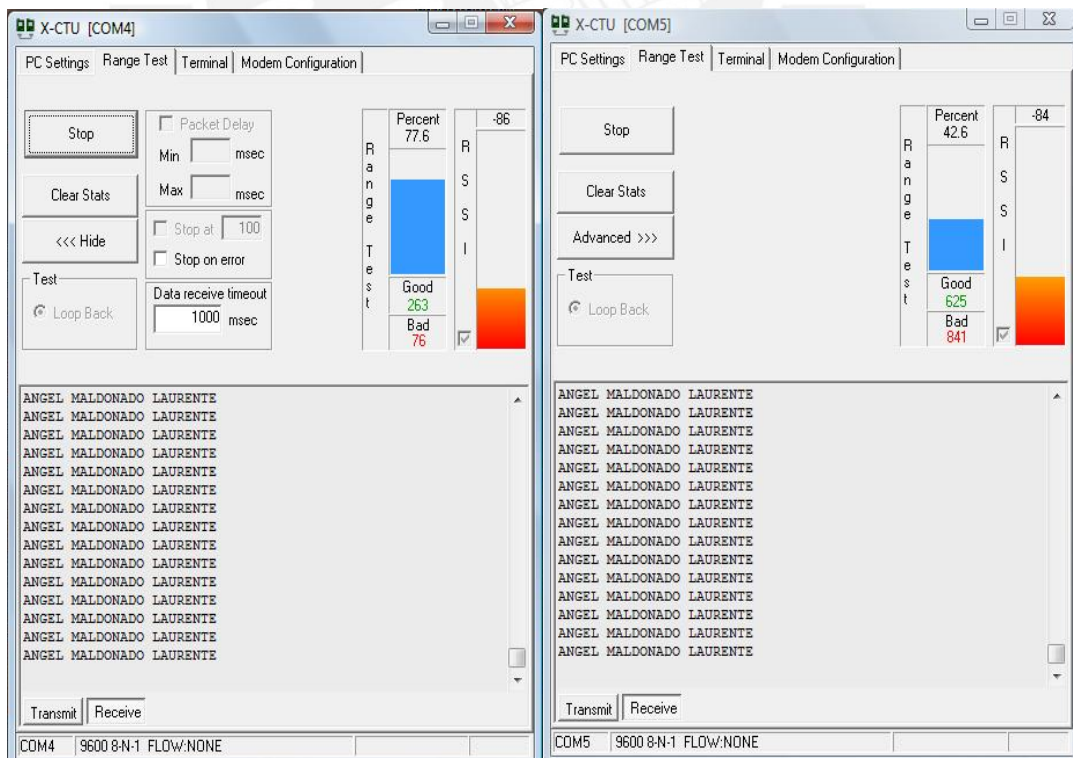


Figura 28: Potencia de recepción medida en la Sala de Fotocopiado de la Recepción. (Punto 12)

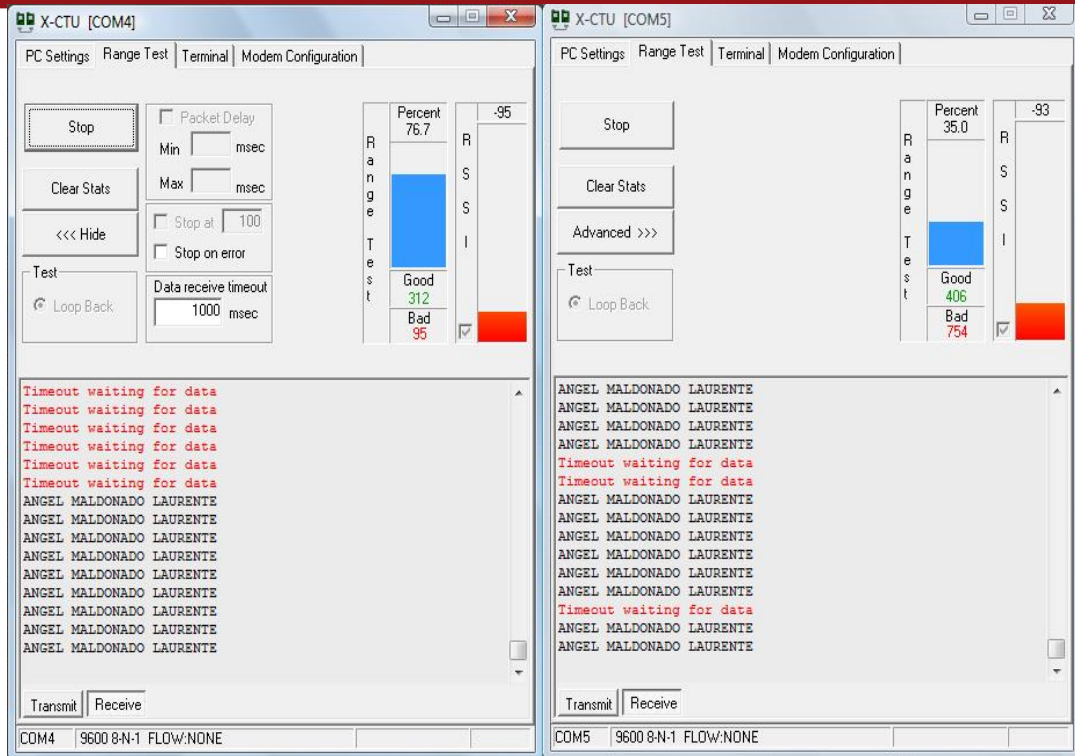


Figura 29: Potencia de recepción medida en la Recepción, Secretaria de Electrónica. (Punto 13)

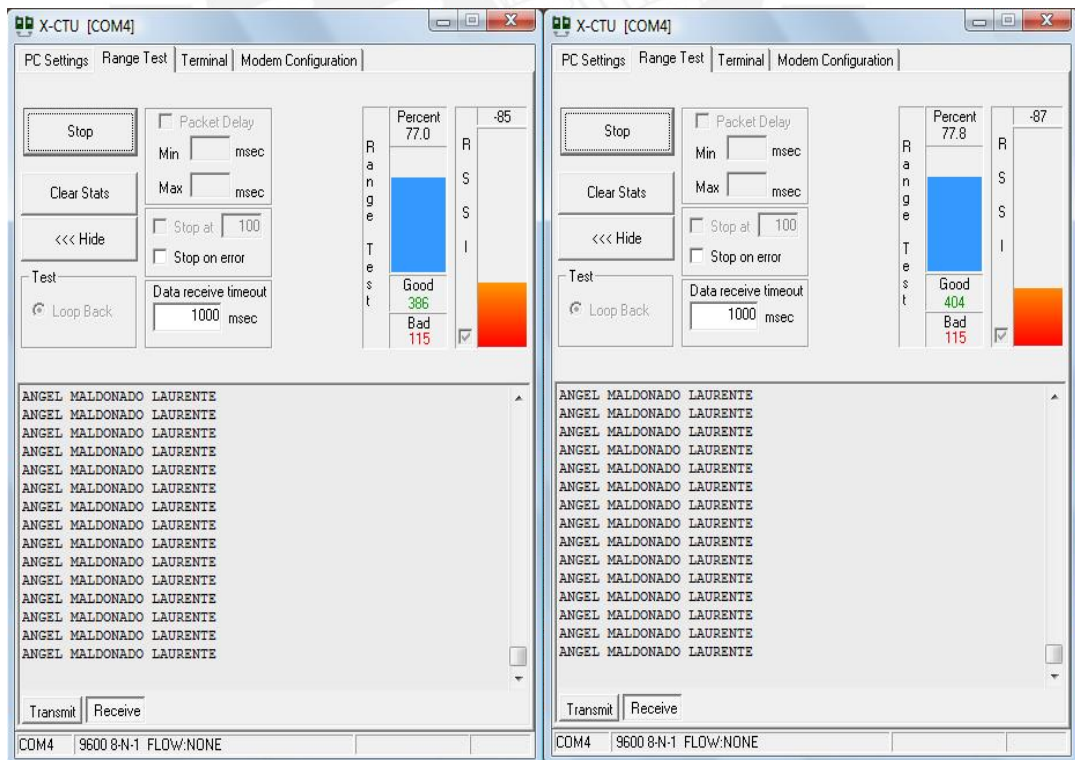


Figura 30: Potencia de recepción medida en la Recepción, Secretaria de Telecomunicaciones. (Punto 14)

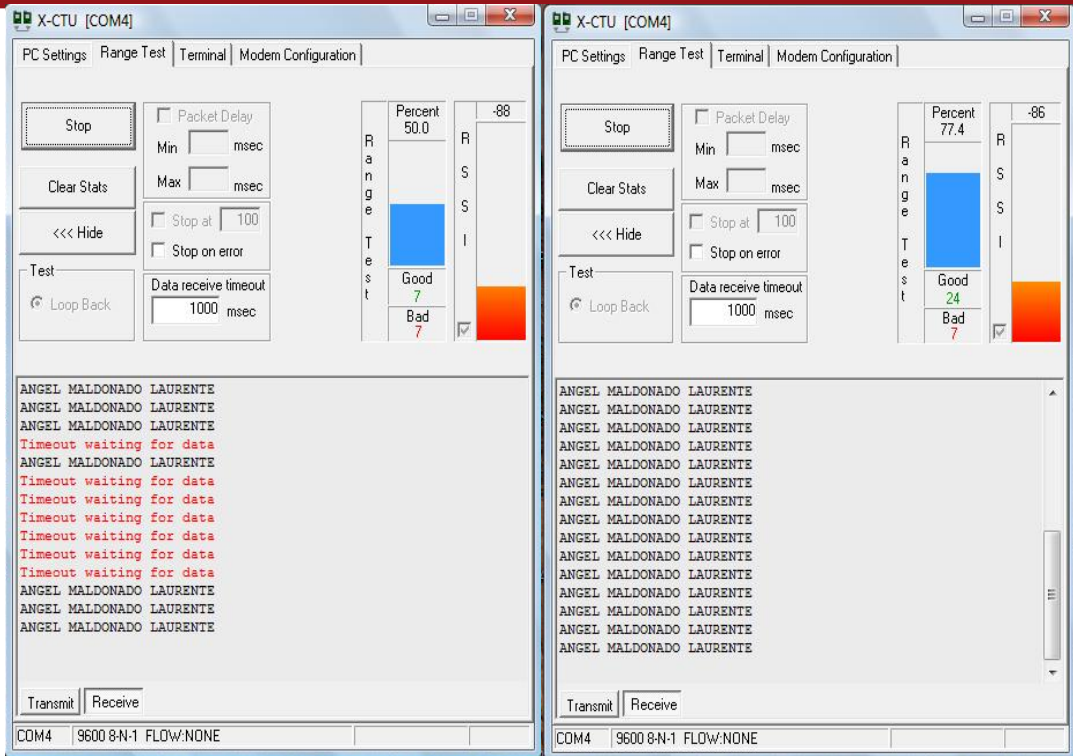


Figura 31: Potencia de recepción medida frente al Laboratorio de Desarrollo de Software. (Punto 15)

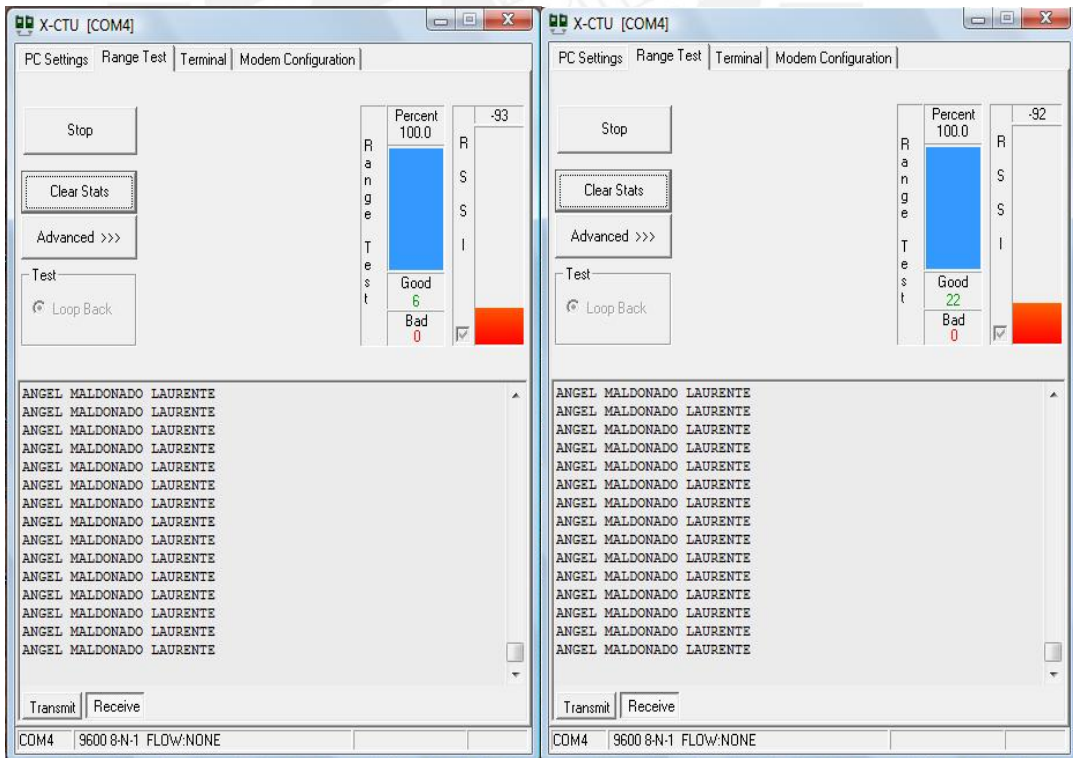


Figura 32: Potencia de recepción medida en el Laboratorio de Desarrollo de Software. (Punto 16)

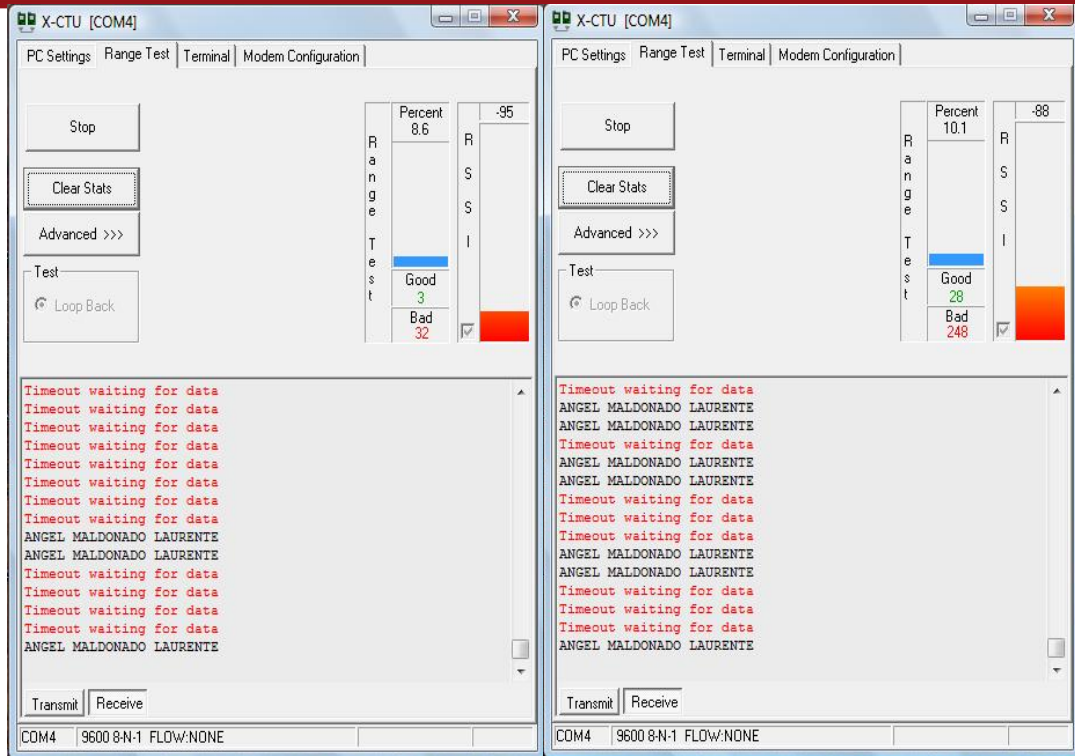


Figura 33: Potencia de recepción medida en el Laboratorio de Desarrollo de Proyectos. (Punto 17)

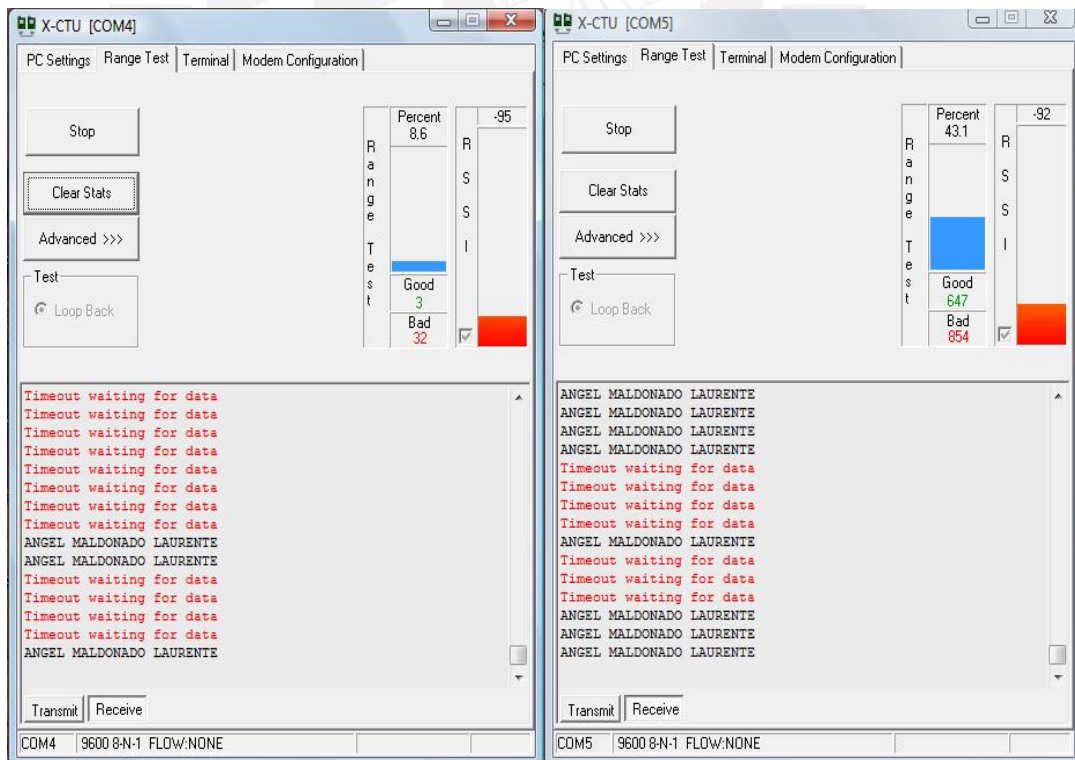


Figura 34: Potencia de recepción medida en el Laboratorio de DSP. (Punto 18)

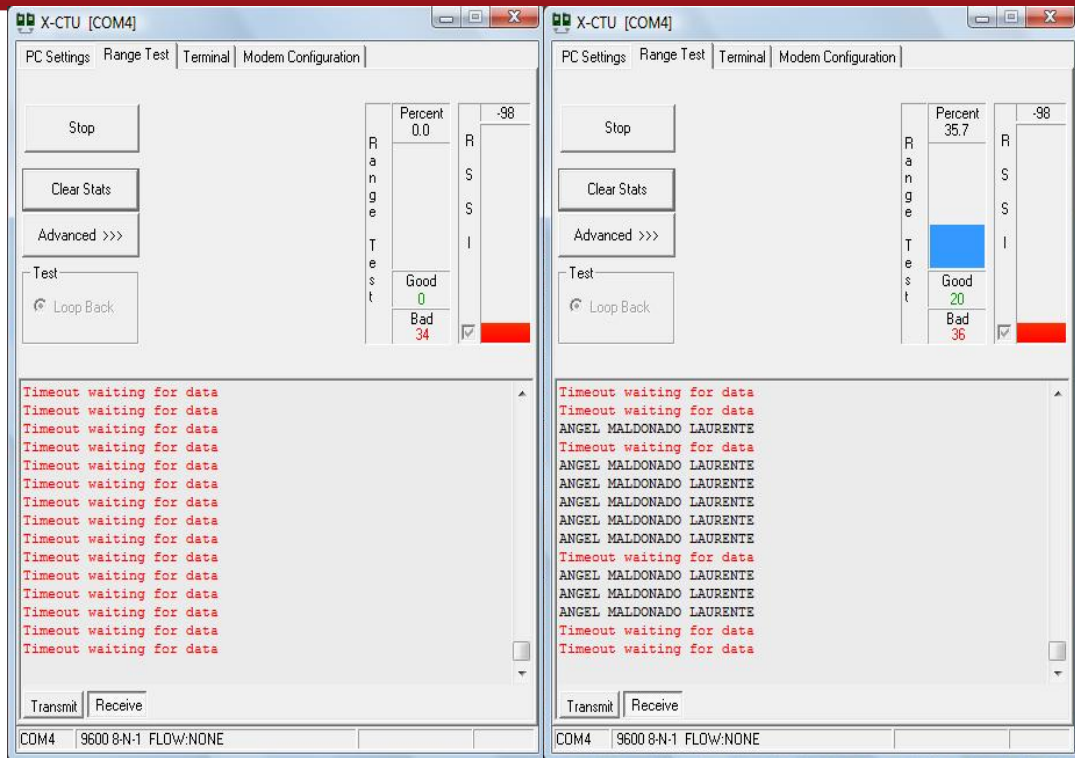


Figura 35: Potencia de recepción medida en el Laboratorio de Microelectrónica. (Punto 19)

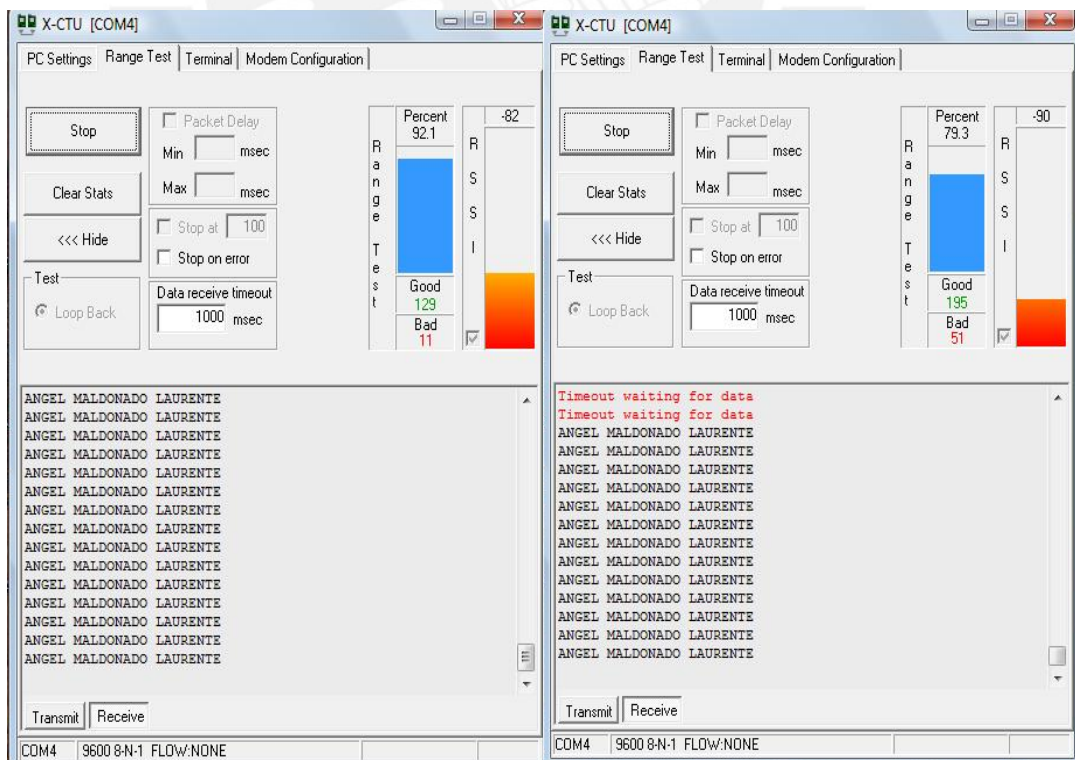


Figura 36: Potencia de recepción medida en la puerta de vidrio, del Hall de entrada del tercer piso. (Punto 20)

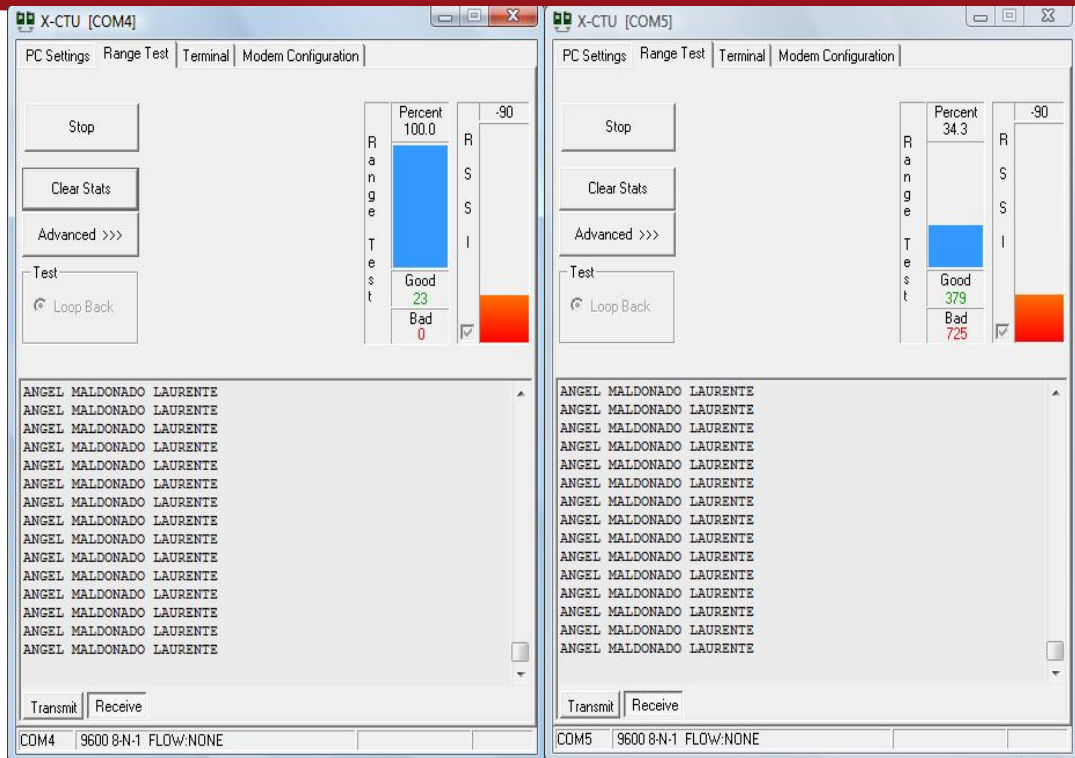


Figura 37: Potencia de recepción medida en las escaleras del Hall de entrada, del tercer piso. (Punto 21)

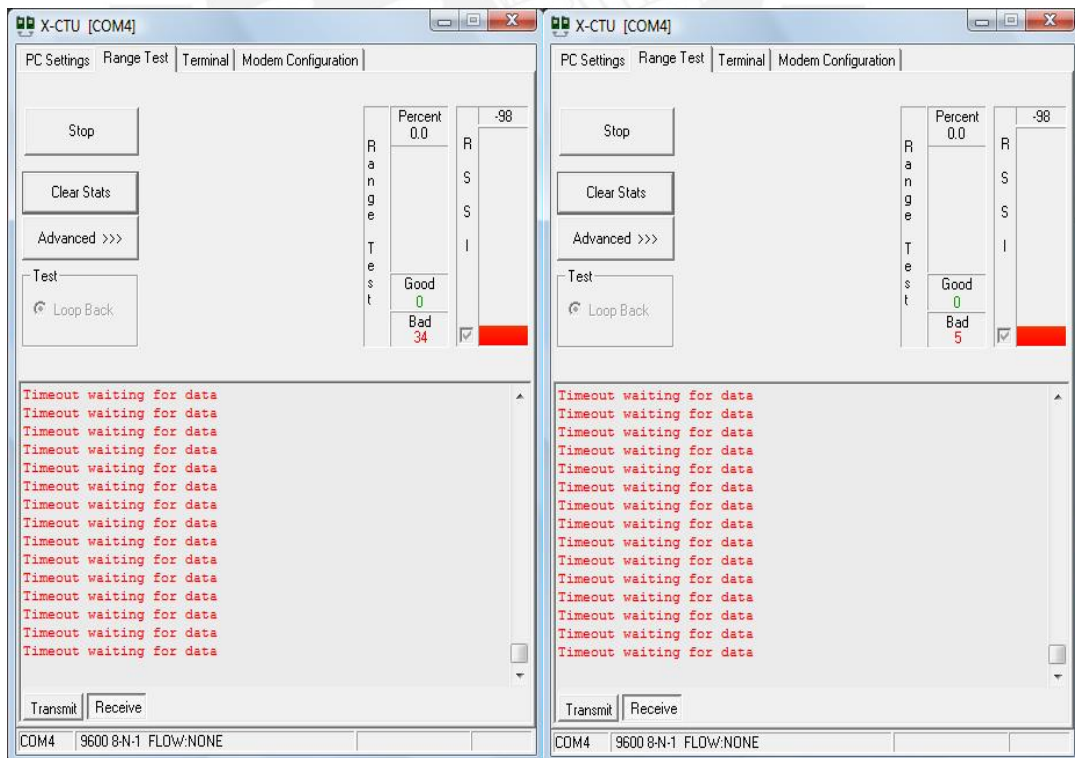


Figura 38: Potencia de recepción medida en los Servicios Higiénicos del tercer piso. (Punto 22)

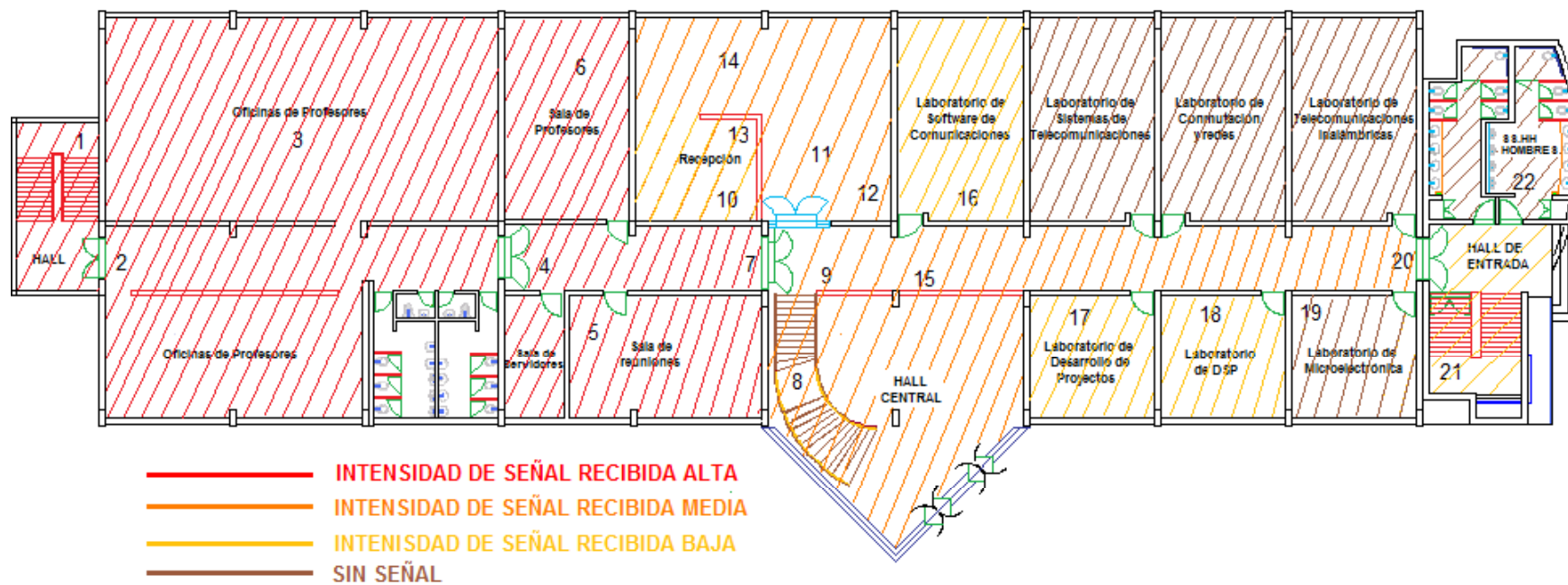


Figura 39

Cobertura y ubicación de la Estación Base en el tercer piso.