

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS FÍSICAS Y
FORMALES**

**PROGRAMA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
ELECTRÓNICA**



**“DISEÑO DE UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES
CON APLICACIÓN EN EL DESARROLLO DE
AGRICULTURA DE PRECISIÓN UTILIZANDO ENERGÍA
RENOVABLE EN LA REGIÓN AREQUIPA”**

Tesis presentada por el Bachiller:

RANDOL ALONSO GUTIÉRREZ TEJADA

Para optar el Título Profesional de
INGENIERO ELECTRÓNICO

AREQUIPA-PERÚ

2014



A Dios, por haberme dado tan excepcional familia y haberme permitido alcanzar mis sueños.

A mis padres Ceferino y Raquel, quienes con todo su apoyo y comprensión permiten que crezca día a día como persona y sea cada vez mejor, les estoy eternamente agradecido.

A mi amor Claudia, por tu valioso apoyo y constante motivación para salir adelante, sin ti y sin tu inmenso amor nada de esto hubiera sido posible.

A mi hermana Susan, por tu constante apoyo, tu valentía y tus logros me han inspirado para salir siempre adelante.

A mis abuelos Pedro y Lucila, gracias a ustedes, he podido ser alguien en la vida.

A mi querido tío Elías, me motivaste a ser siempre el mejor y me apoyaste en todo.



CAPITULO I

| | |
|--------------------------------------|----------|
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1 TÍTULO..... | 2 |
| 1.2 RESÚMEN..... | 2 |
| 1.3 ABSTRACT..... | 3 |
| 1.4 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA..... | 3 |
| 1.5 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA..... | 4 |
| 1.6 OBJETIVOS..... | 6 |
| 1.6.1 Objetivo General..... | 6 |
| 1.6.2 Objetivos Específicos..... | 6 |
| 1.7 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA..... | 7 |
| 1.8 ALCANCE..... | 8 |
| 1.9 VARIABLES..... | 9 |
| 1.9.1 Variable Independiente..... | 9 |
| 1.9.2 Variables Dependientes..... | 9 |
| 1.10 ESTRATEGIA..... | 9 |

CAPITULO II

| | |
|-----------------------------------|-----------|
| MARCO TEÓRICO..... | 10 |
| 2.1 AGRICULTURA DE PRECISION..... | 11 |
| 2.1.1 Definición..... | 11 |
| 2.1.2 Objetivos..... | 13 |
| 2.1.3 Características..... | 14 |

| | | |
|-----------|---|----|
| 2.1.4 | Etapas y Procesos..... | 15 |
| 2.1.5 | Tecnologías Facilitadoras..... | 16 |
| 2.1.6 | Ventajas y Beneficios Potenciales..... | 16 |
| 2.1.7 | Áreas de trabajo..... | 17 |
| 2.1.8 | Situación actual de la Agricultura de Precisión..... | 18 |
| 2.2 | ESTADO DEL ARTE..... | 21 |
| 2.3 | ESTRUCTURA DE LA RED INALAMBRICA DE SENSORES..... | 25 |
| 2.3.1 | Características de la WSN..... | 25 |
| 2.3.1.1 | Protocolos 802.15.4 - ZigBee..... | 25 |
| 2.3.1.2 | Escalabilidad y Topología de red..... | 32 |
| 2.3.1.3 | Gestión de recursos y energía..... | 35 |
| 2.3.2 | Aplicación en el sector agrario..... | 39 |
| 2.3.3 | Arquitectura Hardware de la WSN..... | 39 |
| 2.3.3.1 | Controlador versus microprocesador: ATMEL ATmega 328P..... | 39 |
| 2.3.3.2 | Memoria..... | 41 |
| 2.3.3.3 | Medio de transmisión..... | 42 |
| 2.3.3.4 | Transceptores..... | 42 |
| 2.3.3.4.1 | Características de los transceptores..... | 43 |
| 2.3.4 | Elementos de la WSN..... | 44 |
| 2.3.4.1 | Arduino UNO R3..... | 45 |

| | | |
|-------------|---|----|
| 2.3.4.2 | XBee Shield – Módulo para RF..... | 47 |
| 2.3.4.3 | Módulo XBee Series 2-2 mW..... | 49 |
| 2.3.4.4 | Dispositivo final (End Device)..... | 52 |
| 2.3.4.5 | Nodo Router..... | 54 |
| 2.3.4.6 | Nodo Coordinador..... | 54 |
| 2.3.5 | Módulo XBee S2 y antenas..... | 57 |
| 2.3.5.1 | Hardware XBee..... | 57 |
| 2.3.5.2 | Antenas..... | 59 |
| 2.3.5.3 | Antenas en módulos XBee Series 2..... | 61 |
| 2.3.6 | Operación Módulo XBee UART..... | 63 |
| 2.3.6.1 | Datos Seriales..... | 64 |
| 2.3.6.2 | Envío de paquete UART a través de Módulo XBee..... | 64 |
| 2.3.6.3 | Operación Transparente..... | 65 |
| 2.3.6.3.1 | Empaquetado Serial a RF..... | 65 |
| 2.3.6.3.2 | Formato entrada/salida (I/O)..... | 66 |
| 2.3.6.4 | Direccionamiento de Red..... | 67 |
| 2.3.6.4.1 | Modo Unicast..... | 67 |
| 2.3.6.4.1.1 | Dirección de 16 bits..... | 68 |
| 2.3.6.4.1.2 | Dirección de 64 bits..... | 69 |
| 2.3.6.4.2 | Modo Broadcast..... | 69 |
| 2.3.6.4.3 | Payload Máximo..... | 69 |

| | | |
|-----------|--|----|
| 2.3.6.5 | Modos de Operación..... | 70 |
| 2.3.6.5.1 | Modo Idle..... | 71 |
| 2.3.6.5.2 | Modos Transmisión/Recepción..... | 71 |
| 2.3.6.5.3 | Modo Sleep..... | 73 |
| 2.3.7 | Certificaciones Europeas (ETSI) y requerimientos para Módulos XBee y antenas..... | 75 |
| 2.3.7.1 | Restricciones – Potencia de salida..... | 75 |
| 2.3.7.2 | Antenas aprobadas..... | 75 |
| 2.4 | ANÁLISIS DEL PROTOTIPO DE TERRRENO AGRICOLA..... | 76 |
| 2.4.1 | Ubicación del área del proyecto..... | 76 |
| 2.5 | PLATAFORMA DE HARDWARE LIBRE ARDUINO..... | 77 |
| 2.5.1 | Introducción..... | 77 |
| 2.5.2 | Justificación y ventajas del uso de ARDUINO..... | 78 |
| 2.5.3 | Definición..... | 80 |
| 2.5.4 | Shield de Arduino..... | 82 |
| 2.5.5 | Aplicaciones..... | 82 |
| 2.5.6 | Requerimientos básicos para utilizar ARDUINO..... | 84 |
| 2.6 | ENERGÍA RENOVABLE-PANEL FOTOVOLTAICO..... | 84 |
| 2.6.1 | Definición..... | 84 |
| 2.6.2 | Características..... | 85 |
| 2.6.3 | Tipos..... | 86 |
| 2.6.4 | Energía Solar Fotovoltaica..... | 86 |

| | | |
|--|---|-----|
| 2.6.4.1 | Panel Fotovoltaico..... | 88 |
| 2.6.4.2 | Sistemas Fotovoltaicos..... | 89 |
| 2.6.4.2.1 | Elementos de un Sistema Fotovoltaico..... | 89 |
| 2.6.4.2.2 | Tipos de sistemas fotovoltaicos..... | 90 |
| 2.6.4.2.3 | Aplicaciones..... | 94 |
| | | |
| CAPITULO III | | |
| DISEÑO DE LA RED INALÁMBRICA DE SENSORES..... | | |
| | | 96 |
| 3.1 | SISTEMA DE COMUNICACIÓN..... | 97 |
| 3.2 | MÓDULO XBEE S2..... | 104 |
| 3.2.1 | Configuraciones Modo Comando para modulo Inalámbrico..... | 104 |
| 3.2.2 | Software X-CTU..... | 108 |
| 3.2.3 | PC..... | 114 |
| 3.3 | CÁLCULOS PARA EL DISEÑO DE LA TOPOLOGÍA DE RED FÍSICA Y DE ANTENAS PARA EL DESPLIEGUE..... | 114 |
| 3.3.1 | Zona de Fresnel..... | 115 |
| 3.3.2 | Cálculo de la ganancia de la antena..... | 118 |
| 3.3.3 | Cálculo de la longitud de onda de la antena..... | 119 |
| 3.3.4 | Cálculo relación Potencia vs. Distancia..... | 120 |
| 3.3.5 | Relación Cantidad de nodos vs. Throughput..... | 126 |
| 3.4 | POSICIONAMIENTO DE NODOS EN PROTOTIPO..... | 128 |
| 3.5 | ESTUDIO DE ALCANCE CON RADIO MOBILE..... | 130 |
| 3.5.1 | Ubicación de nodos..... | 132 |

| | <i>Indice</i> |
|---|---------------|
| 3.5.2 Configuración de Propiedades de las Redes..... | 133 |
| 3.5.3 Configuración de Propiedades de las Antenas..... | 134 |
| 3.5.4 Análisis de simulación..... | 136 |
| 3.6 TOPOLOGÍA DE RED LÓGICA..... | 140 |
| 3.6.1 Direccionamiento PAN..... | 140 |
| 3.6.2 Descubrimiento de direccionamiento de Red..... | 140 |
| 3.7 SENSORES..... | 142 |
| 3.7.1 Sensor de Humedad y Temperatura Relativa..... | 145 |
| 3.7.2 Sensor de Humedad de Suelo..... | 145 |
| 3.8 CHASIS PARA LOS DISPOSITIVOS..... | 147 |
| 3.9 ENERGÍA PARA EL SISTEMA..... | 148 |
| CAPITULO IV | |
| IMPLEMENTACION Y PRUEBAS DE LA RED..... | 153 |
| 4.1 INICIO DE LA RED INALÁMBRICA..... | 154 |
| 4.2 VERIFICACIÓN Y ANÁLISIS DEL RANGO DE ALCANCE DE LOS MÓDULOS XBEE S2..... | 157 |
| 4.3 PRUEBAS CON PROTOTIPO Y RESULTADOS..... | 170 |
| 4.3.1 Prueba Conexión Punto-Punto..... | 170 |
| 4.3.2 Prueba conexión Punto-Multipunto..... | 174 |
| 4.3.3 Prueba y configuración final en Estrella de los elementos De la WSN..... | 178 |
| 4.3.4 Configuración para el inicio de la WSN..... | 180 |

| | | |
|--|---|-----|
| 4.3.5 | Conexión final de elementos en cada nodo..... | 185 |
| 4.3.6 | Resultados Finales de la WSN..... | 185 |
| | | |
| CAPITULO V | | |
| COSTOS..... | | |
| | | 197 |
| 5.1 | COSTO DE LOS COMPONENTES ELECTRÓNICOS..... | 200 |
| 5.2 | COSTO TOTAL DEL PROYECTO Y RENTABILIDAD..... | 201 |
| | | |
| CAPITULO VI | | |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | | |
| | | 204 |
| CONCLUSIONES..... | | |
| | | 205 |
| RECOMENDACIONES..... | | |
| | | 206 |
| | | |
| ANEXO I | | |
| DIAGRAMAS ESQUEMATICOS | | |
| Diagrama Esquemático Arduino UNO | | |
| Diagrama Esquemático XBee Shield | | |
| Diagrama Esquemático Wireless Shield XBee | | |
| | | |
| ANEXO II | | |
| XBEE DATASHEET | | |

ANEXO III

SENSORES

Sensor De Humedad Y Temperatura Dht11

Modulo Sensor De Humedad De Suelo

ANEXO IV

ESTRUCTURA LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN ARDUINO

ANEXO V

SKETCH SENSORES

Sketch Sensor de Humedad del Suelo

Sketch Sensor de Humedad -Temperatura Relativa.

ANEXO VI

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Páginas Web

Documentos PDF Web

Libros



| | | |
|--------------------|--|----|
| Figura 2.1 | : Variables que influyen en el riego y fertilización de Plantas..... | 13 |
| Figura 2.2 | : Espectro de canales del IEEE 802.15.4..... | 27 |
| Figura 2.3 | : Estructura de canales del IEEE 802.15.4..... | 27 |
| Figura 2.4 | : Comunicación ZigBee entre nodos..... | 29 |
| Figura 2.5 | : ZigBee y 802.15.4..... | 32 |
| Figura 2.6 | : Tipos de Topologías en redes WSN..... | 34 |
| Figura 2.7 | : Panel Solar 8V..... | 37 |
| Figura 2.8 | : Consumo de energía por operación..... | 38 |
| Figura 2.9 | : Estructura de un transceptor..... | 44 |
| Figura 2.10 | : Arduino UNO con controlador ATmega328p..... | 46 |
| Figura 2.11 | : XBee Shield..... | 47 |
| Figura 2.12 | : Módulo RF XBee Serie 2..... | 51 |
| Figura 2.13 | : Hardware Arduino Uno con Shield XBee y módulo XBee S2..... | 52 |
| Figura 2.14 | : Diagrama elementos en nodo final..... | 53 |
| Figura 2.15 | : Módulo XBee Serie 2 y Módulo XBee PRO Serie 2..... | 58 |
| Figura 2.16 | : Conexión Microcontrolador con módulo XBee..... | 58 |
| Figura 2.17 | : Módulos XBee..... | 61 |
| Figura 2.18 | : Comunicación UART entre módulos XBee..... | 63 |
| Figura 2.19 | : Transmisión señal UART en XBee..... | 64 |
| Figura 2.20 | : Formato de entrada/salida..... | 66 |
| Figura 2.21 | : Modos Operación ZigBee..... | 70 |

| | | |
|--------------------|---|-----|
| Figura 2.22 | : Prototipo de despliegue de proyecto..... | 77 |
| Figura 2.23 | : Entorno físico de una tarjeta Arduino..... | 82 |
| Figura 2.24 | : Esquema típico de un sistema fotovoltaico autónomo..... | 91 |
| Figura 2.25 | : Esquema típico de un sistema mixto fotovoltaico-diesel..... | 92 |
| Figura 2.26 | : Esquema de una instalación fotovoltaica conectada A la red..... | 93 |
| Figura 3.1 | : Diagrama de bloques de la red inalámbrica a diseñar..... | 101 |
| Figura 3.2 | : Esquema de comunicación WSN..... | 104 |
| Figura 3.3 | : Ejemplo Comando AT..... | 106 |
| Figura 3.4 | : Ejemplo escritura de parámetros..... | 106 |
| Figura 3.5 | : Ejemplo lectura de parámetros..... | 107 |
| Figura 3.6 | : Página Web de DIGI International..... | 109 |
| Figura 3.7 | : Opción PC Settings..... | 110 |
| Figura 3.8 | : Opción Range Test..... | 111 |
| Figura 3.9 | : Opción Terminal..... | 112 |
| Figura 3.10 | : Opción Modem Configuration..... | 113 |
| Figura 3.11 | : Zona Fresnel a) y b)..... | 116 |
| Figura 3.12 | : Gráfica relación Potencia vs. Distancia para la frecuencia de 2.4 GHz..... | 126 |
| Figura 3.13 | : Posible ubicación de nodos en prototipo de terreno de cultivo..... | 129 |
| Figura 3.14 | : Ubicación de nodos en Google Maps..... | 130 |
| Figura 3.15 | : Ubicación de los nodos en Radio Mobile..... | 132 |

| | | |
|--------------------|---|-----|
| Figura 3.16 | : Propiedades de las redes..... | 133 |
| Figura 3.17 | : Configuración parámetros de las antenas..... | 135 |
| Figura 3.18 | : Estado final de Nodos..... | 136 |
| Figura 3.19 | : Resultados de Enlace de Radio..... | 137 |
| Figura 3.20 | : Simulación de Zona de Fresnel..... | 138 |
| Figura 3.21 | : Cobertura de los nodos..... | 139 |
| Figura 3.22 | : Dirección de datos en la Red..... | 142 |
| Figura 3.23 | : Sensor de Humedad y Temperatura Relativa..... | 145 |
| Figura 3.24 | : Sensor de Humedad del suelo..... | 146 |
| Figura 3.25 | : Chasis para Dispositivos..... | 147 |
| Figura 3.26 | : Tubo Corrugado..... | 148 |
| Figura 3.27 | : Batería recargable y Panel Solar..... | 152 |
| Figura 4.1 | : Instalación Nodo Final..... | 156 |
| Figura 4.2 | : Seleccionar firmware..... | 158 |
| Figura 4.3 | : Potencia y paquetes enviados a 5 m..... | 162 |
| Figura 4.4 | : Potencia y paquetes enviados a 20 m..... | 164 |
| Figura 4.5 | : Potencia y paquetes enviados a 50 m..... | 166 |
| Figura 4.6 | : Potencia y paquetes enviados a 70 m..... | 168 |
| Figura 4.7 | : Conexión para prueba punto a punto..... | 172 |
| Figura 4.8 | : Datos recibidos por el Terminal..... | 173 |
| Figura 4.9 | : Conexión para prueba punto multipunto..... | 176 |
| Figura 4.10 | : Datos recibidos y enviados..... | 177 |
| Figura 4.11 | : Esquema de interconexion elementos WSN..... | 178 |

| | | |
|--------------------|--|-----|
| Figura 4.12 | : Nodo Coordinador XCTU..... | 182 |
| Figura 4.13 | : Nodo Router XCTU..... | 183 |
| Figura 4.14 | : Nodo Final XCTU..... | 184 |
| Figura 4.15 | : Conexionado actual..... | 185 |
| Figura 4.16 | : Prueba de conectividad de dispositivos..... | 187 |
| Figura 4.17 | : Sketch configurado en nodo Final o nodo Router Sensor de Temperatura y Humedad relativa..... | 188 |
| Figura 4.18 | : Sketch configurado en nodo Final o nodo Router Sensor de Humedad del suelo..... | 189 |
| Figura 4.19 | : Test Recepción de datos en Coordinador en XCTU..... | 190 |
| Figura 4.20 | : Datos en Hyperterminal..... | 191 |
| Figura 4.21 | : Prototipo de terreno de cultivo y area de ubicación de los nodos de la Red Inalámbrica de Sensores..... | 193 |
| Figura 4.22 | : Estación Base..... | 194 |
| Figura 4.23 | : Nodo Coordinador..... | 194 |
| Figura 4.24 | : Nodo Router – Sensor Humedad y Temperatura Relativa..... | 195 |
| Figura 4.25 | : Nodo Final – Sensor Humedad del Suelo..... | 195 |
| Figura 4.26 | : Panel Solar..... | 196 |
| Figura 4.27 | : Medida de Voltaje-Panel Solar..... | 196 |



ÍNDICE DE TABLAS

Índice de Tablas

| | | |
|-------------------|--|-----|
| Tabla 2.1 | : Frecuencia de los canales del IEEE 802.15.4..... | 28 |
| Tabla 2.2 | : Comparación de tecnologías de RF..... | 30 |
| Tabla 2.3 | : Clasificación baterías..... | 36 |
| Tabla 2.4 | : Comparación de características Xbee Serie 1 y Serie 2..... | 50 |
| Tabla 2.5 | : Relación canales y frecuencias..... | 55 |
| Tabla 2.6 | : Dispositivos Xbee Serie 2..... | 62 |
| Tabla 2.7 | : Parámetros MY, DH, y DL..... | 68 |
| Tabla 2.8 | : Payload máximo..... | 70 |
| Tabla 2.9 | : Especificaciones modo Sleep..... | 74 |
| Tabla 2.10 | : Variación de voltaje y consumo en modo Sleep..... | 75 |
| Tabla 3.1 | : Posición de Nodos..... | 129 |
| Tabla 3.2 | : Salto de nodos..... | 141 |
| Tabla 4.1 | : Atenuación de la señal en varios objetos..... | 160 |
| Tabla 4.2 | : Niveles de atenuación para diferentes materiales..... | 160 |
| Tabla 4.3 | : Valores de Eficiencia y RSSI con Línea de Vista..... | 169 |
| Tabla 4.4 | : Parámetros configuración punto-punto..... | 171 |
| Tabla 4.5 | : Parámetros configuración punto-multipunto..... | 175 |
| Tabla 4.6 | : Parámetros configuración nodos WSN..... | 181 |
| Tabla 5.1 | : Precios de elementos..... | 199 |
| Tabla 5.2 | : Costo de Componentes del Equipo Coordinador..... | 200 |
| Tabla 5.3 | : Costo de Componentes del Equipo Router/Final..... | 201 |
| Tabla 5.4 | : Costo del Sistema..... | 202 |
| Tabla 5.5 | : Costo mano de obra e instalación..... | 202 |

CAPÍTULO I



1.1 TÍTULO

“DISEÑO DE UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES CON APLICACIÓN EN EL DESARROLLO DE AGRICULTURA DE PRECISIÓN UTILIZANDO ENERGÍA RENOVABLE EN LA REGIÓN AREQUIPA”

1.2 RESÚMEN

El siguiente trabajo de tesis trata de abordar la problemática del sector Agrícola en el Perú y en especial es nuestra región Arequipa. La dificultad que existe de obtener información al momento y confiable de ciertas variables importantes en un terreno agrícola, es solucionado por la Agricultura de Precisión, la cual no está muy desarrollada en nuestra región debido a diferentes factores, entre ellos uno de los más importantes el económico.

Lo que se quiere lograr es usar las redes inalámbricas de sensores como una alternativa para aliviar esta problemática. Esta tecnología no tan costosa es capaz de dar un sinnúmero de soluciones a diversos problemas actuales que se generan por la falta de información.

Se utiliza el Diseño de la Red Inalámbrica de Sensores usando tecnología ZigBee como una alternativa de solución a la necesidad de obtener información inmediata y confiable, además el de utilizar energía renovable para asegurar la energía eléctrica del sistema.

1.3 ABSTRACT

The following work of thesis, seeks to address the problems of the Agricultural sector in Peru and especially in our region Arequipa. The difficulty of obtaining information at the moment and reliable, of some important variables on agricultural land, is solved by precision farming, which is not very developed in our region due to several factors, including one of the most important the economical.

That which we want to achieve is to use the wireless networks of sensors as an alternative to relieve this problem. This not so expensive technology is able to give a number of solutions to many current problems caused by the lack of information.

It presents the design of the wireless network of sensors using ZigBee technology as an alternative of solution to the need for immediate and reliable information, and using renewable energy to ensure the electrical energy of system.

1.4 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La problemática de la Agricultura en nuestra región Arequipa y en general en el Perú se va incrementando y sigue siendo vigente, no ha habido crecimiento significativo que haya beneficiado a los productores.

Existe un mal manejo del sector Agrícola, no existe un correcto uso del recurso hídrico, ni de fertilizantes, no existe un adecuado uso del terreno, no se obtiene información inmediata de la falta o no de algunos componentes o sustancias para

determinados productos y tampoco de las condiciones del terreno ni del medio ambiente, además aún en zonas rurales existe un serio déficit de energía eléctrica.

La situación de pobreza de un gran sector de campesinos y pequeños productores agropecuarios se explica en parte por la utilización inadecuada y degradación de la base productiva de los recursos naturales, debido a la aplicación de sistemas productivos que generan desequilibrios negativos entre el proceso de extracción y regeneración de los recursos naturales.

Por ello es necesario lograr tecnificar la Agricultura, ya que éste es un sector estratégico para el desarrollo de nuestra región y nuestro país, es por eso que se quiere dar un aporte de la Ingeniería Electrónica, en especial de las Telecomunicaciones para tratar de solucionar esta problemática.

1.5 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El incremento de problemas medioambientales, la necesidad de producir alimentos de calidad relativamente constante, el agotamiento de tierras cultivables son uno de los mayores problemas en nuestra región así como en el Perú, cuyo desarrollo Agrícola aún está en sus inicios.

Lamentablemente una gran mayoría de pobladores dedicados a la Agricultura la sigue desarrollando de manera tradicional, a pesar de que la tecnología está al

alcance de todos gracias a Internet. Si no se toman medidas al respecto, las consecuencias inmediatas serán que ésta actividad dejará de ser competitiva y rentable, a comparación de otras regiones o países que si toman medidas y experimentan una constante mejoría.

En el futuro, un agricultor debe ser capaz de trabajar con un sector competitivo con demandas más exigentes, precios más ajustados y necesidad de alimentos de mayor calidad, la aplicación de nuevas tecnologías es una obligación y una necesidad y ello solo será posible si se empieza a utilizar tecnología en la Agricultura.

Agricultura de Precisión es efectuar la intervención correcta en el momento adecuado y en el lugar preciso. Efectuar la intervención correcta significa por ejemplo, aportar dosis del nutriente, para ello es necesario el manejo de dispositivos y sensores electrónicos principalmente de Temperatura y Humedad. El momento adecuado está relacionado con la mayor o menor automatización de la acción, es decir el poder modificar las cantidades de producto en el instante que ello sea necesario, por ejemplo, la cantidad de agua. En el lugar preciso, por ejemplo, el riego por goteo donde el suministro de agua es altamente eficiente.

Es por ello, que las nuevas tecnologías utilizadas por la Agricultura de Precisión pretenden reemplazar ésta práctica visual por tecnología cuyo objetivo es mejorar, facilitar e incrementar la actividad Agrícola para que se convierta en una actividad rentable, competitiva y tenga una buena perspectiva a futuro.

1.6 OBJETIVOS

1.6.1 Objetivo General

El siguiente trabajo de tesis tiene como objetivo:

- Diseñar una Red Inalámbrica de Sensores con escalabilidad que permita medir aquellas variables que son sensibles en términos de la calidad del cultivo, suelo, condiciones ambientales, fundamentalmente la Humedad y la Temperatura para lograr ahorro de capital, optimizando la utilización y racionalización del recurso hídrico, pensando en el futuro crecimiento de las áreas a ser sensadas presentando la información de manera accesible.

1.6.2 Objetivos Específicos

- Analizar sobre la obtención de datos a través del desarrollo del Sistema Inalámbrico de Sensores utilizando una adecuada topología de Red, puesto que se busca cubrir la mayor cantidad de terreno posible siendo capaz de generar de forma precisa, rápida y barata la información necesaria.
- Analizar y determinar la disponibilidad de Recursos Energéticos para generar Energía Eléctrica, insumo primordial para el funcionamiento de circuitos y sistemas, haciendo uso de Energía Renovable específicamente paneles fotovoltaicos.

1.7 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

En la actualidad el desarrollo de la Agricultura sigue siendo un problema vigente, es por ello que se quiere tratar de ayudar a aliviar el mismo mediante el uso de herramientas de la Ingeniería Electrónica específicamente las Telecomunicaciones.

Para ello se va a hacer uso de las llamadas Redes Inalámbricas de Sensores, del inglés Wireless Sensor Network (WSN), consistentes en Redes formadas por Sensores individuales que brindan información independientemente sin la necesidad de cables y mediante un protocolo de comunicación pre-establecido.

Se hace uso de esta alternativa por la estructura, características y potenciales beneficios que presentan y que se adecuan a nuestro caso de estudio.

Lo que se pretende lograr es que las Redes Inalámbricas de Sensores se conviertan en una alternativa de un solo gasto, con una gran escalabilidad y flexibilidad de implementación permitiendo tener información inmediata y por sectores para elevar la calidad de los productos y reducir los costos.

De esta manera poder tener capacidad de reacción predictiva frente a problemas que se pudieran presentar en los cultivos mejorando la calidad de los mismos con el propósito de mejorar y aumentar la producción e ir desarrollando la Agricultura de Precisión en nuestra Región y nuestro País.

1.8 ALCANCE

El presente trabajo de tesis consta del Diseño de una Red Inalámbrica de Sensores, que dispondrá básicamente de los siguientes elementos: Sensores, Nodo Final, Nodo Router y Nodo Coordinador o Estación Base para recolectar los datos sensados.

Se utilizará sensores para obtener datos, básicamente de dos variables: Temperatura y Humedad, siendo posible la adición de otras variables que se crean necesarias.

En el Diseño de la Red se trabajará con la Topología tipo Estrella siendo viable trabajar también con Topología tipo Malla por contar con características necesarias para nuestro sistema, además se trabajará con el Protocolo Inalámbrico ZigBee, en la banda de 2.4GHz.

En la etapa de sensado y envío inalámbrico se trabajará con la Plataforma de Hardware Libre ARDUINO y módulos XBee S2.

Para asegurar la Energía Eléctrica de nuestro sistema se hará una valoración de las diferentes opciones energéticas, principalmente la Energía Renovable con paneles fotovoltaicos, promoviendo el cuidado del medio ambiente, así como el uso de Baterías Recargables.

1.9 VARIABLES

1.9.1 Variable Independiente

- Protocolo de Comunicación.

1.9.2 Variables Dependientes

- Consumo de recursos hídricos específicamente Humedad y variación de Temperatura.

1.10 ESTRATEGIA

- Implementación y Diseño de Red Inalámbrica de Sensores (WSN) utilizando el protocolo ZigBee y valiéndonos de la Plataforma de Hardware Libre ARDUINO para la parte de sensado y XBee S2 para la comunicación inalámbrica.
- Utilización de Energía Renovable específicamente Panel Solar Fotovoltaico para asegurar la dotación de Energía Eléctrica para nuestro sistema, adicionalmente se podrán usar Baterías Recargables.
- Se simulará la Red Inalámbrica de Sensores (WSN) en un huerto como un prototipo de un terreno de cultivo.

CAPÍTULO II



2.1 AGRICULTURA DE PRECISIÓN

2.1.1 Definición

La Agricultura tiene el desafío constante de aumentar la producción en respuesta a la creciente demanda de la población. Para ello se requiere la expansión de nuevas áreas agrícolas así como el incremento de rendimientos de las mismas, ello implica su mejoramiento, insumos más eficientes y riego-fertilización.

Atendiendo a los conceptos de sustentabilidad ambiental y económica surge la necesidad de desarrollar técnicas que cuantifiquen y manejen diferencialmente la variabilidad natural de cada área, a partir de allí se comienza a delinear un nuevo concepto de agricultura, el de Agricultura de Precisión.

La Agricultura de Precisión es un conjunto de técnicas orientado a optimizar el uso de insumos en función de la variabilidad espacial y temporal. Esta optimización se logra con la distribución de la cantidad correcta de insumos según el potencial y necesidad de cada punto de manejo. No es solo medir la variabilidad existente en el área, sino también en adoptar prácticas administrativas en función de esa variabilidad. Lo diferente es la posibilidad de identificar, cuantificar, mapear y geo-referenciar esa variabilidad y aplicar insumos con dosis variables en áreas de coordenadas conocidas.

La variabilidad se observa en la fertilidad del suelo, contenido de humedad, textura, topografía, vigor del cultivo, incidencia de insectos, enfermedades, cantidad de malezas, etc. Sin embargo, este no es el único problema que afrontan los productores, la amplia gama de variables a considerar por un productor en el momento de tomar una decisión es sumamente extensa.

En la Figura 2.1 se aprecia que para lograr la maximización de la producción al costo más eficiente en riego y fertilización, las variables que afectan cada decisión van desde el tipo de suelo pasando por el clima y geografía en que se cultiva y terminando en el mismo estado actual de la planta que se ha visto afectada hasta ese momento por todos los demás factores. No es de extrañar que muchas veces los productores tengan que afrontar fuertes pérdidas de dinero debido a que la producción no pasa los estándares de calidad o de salud, debido a la falta de información o del retraso con que llega dicha información a sus manos.

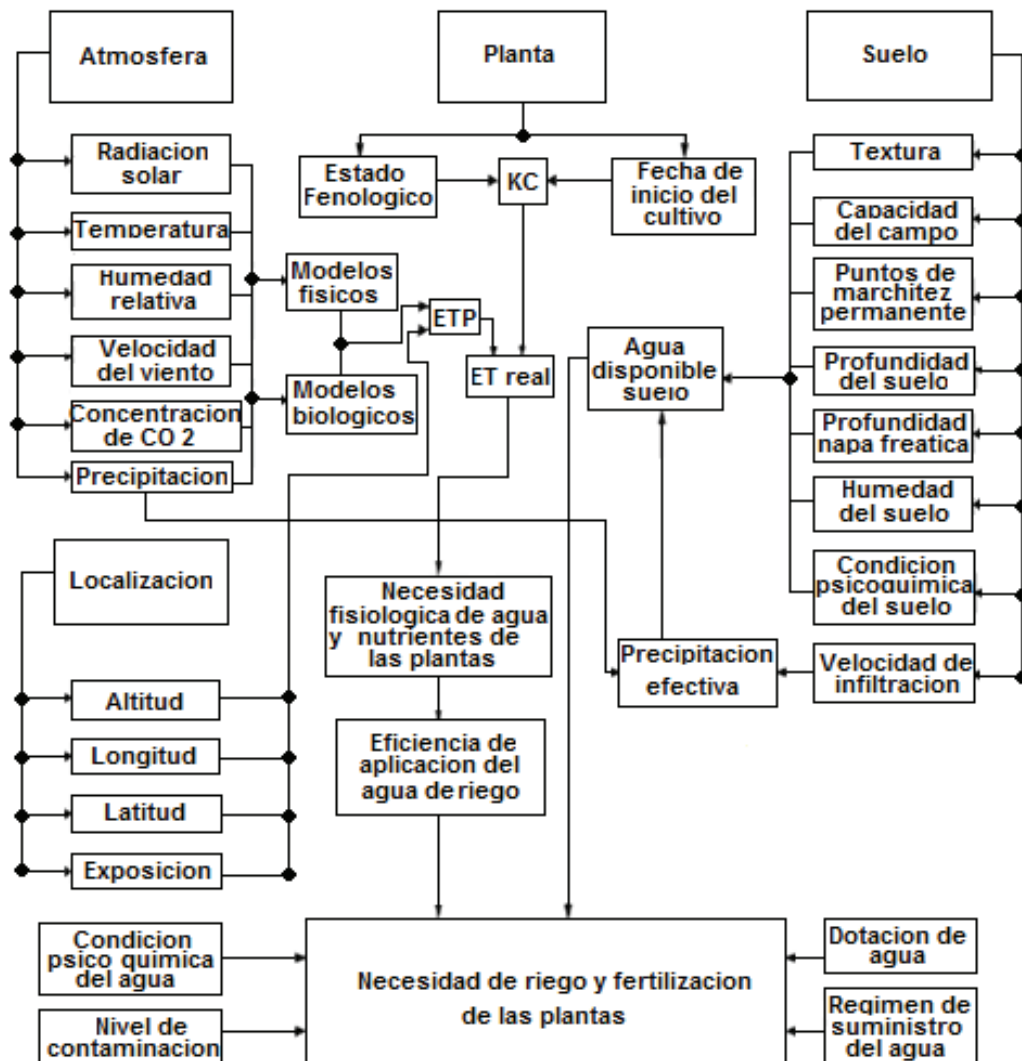


Figura 2.1: Variables que influyen en el riego y fertilización de plantas

2.1.2 Objetivos

La agricultura de precisión tiene como objeto optimizar la gestión de un campo de cultivo desde el punto de vista: agronómica, medioambiental y económica.

- Agronómica: ajuste de las prácticas de cultivo a las necesidades de la planta.
- Medioambiental: reducción del impacto vinculado a la actividad agrícola.
- Económica: aumento de la competitividad a través de una mayor eficacia de las prácticas.

Además, pone a disposición del agricultor numerosas informaciones que pueden:

- Constituir una memoria real del campo.
- Ayudar a la toma de decisiones.
- Ir en la dirección de las necesidades de trazabilidad.
- Mejorar la calidad intrínseca de los productos agrícolas.

2.1.3 Características

- La Agricultura de Precisión, es una nueva tecnología, en constante evolución, que se viene desarrollando en diferentes países, debido a que aumenta la eficiencia productiva.
- Posibilita el uso más racional del variado potencial agrícola de los campos, ahorro de insumos y el aumento rentable de los rendimientos.
- En un corto tiempo ningún agricultor que pretenda ser eficiente y competitivo, podrá manejar su campo con datos promedio de lotes. Solo los que usen la tecnología de aplicación variable de insumos por ambiente, denominada sitio específico, producirán en forma rentable. Los servicios, software, máquinas,

monitores y equipos disponibles para la agricultura de precisión, son de excelente calidad, e incluyen la última tecnología a nivel mundial.

2.1.4 Etapas y Procesos

La agricultura de precisión presenta como etapas o procesos los siguientes:

- En una primera etapa, pueden realizarse zonificaciones de grandes ambientes, a partir de imágenes satelitales, para conocer la variabilidad a nivel macro, de sus campos. O pueden empezar directamente, con los monitoreos de cosecha con GPS, que detectan la variabilidad intra-lote, combinada con imágenes satelitales.
- En una segunda etapa, se realizan muestreos de suelo por ambientes, para confeccionar mapas de materia orgánica, fósforo, salinidad, etc. que se superponen por capas, en un software SIG o Sistema de Información Geográfica. Con estos elementos, se realizan mapas de prescripción variable de insumos, usando la información acumulada, para aplicar pulverizaciones, fertilizaciones y siembras sitio específico, en cada sector de los lotes. Con los mapas de aplicación de insumos que entregan los monitores, se visualiza metro a metro, la uniformidad de las dosis de fertilización o siembra y las velocidades con que se efectuaron las labores. Esto permite además, controlar la labor de los contratistas.
- Finalmente, se pueden usar fotografías aéreas multiespectrales, para detectar el crecimiento diferencial o el estrés hídrico dentro de los lotes, y efectuar re-

fertilizaciones dirigidas con nitrógeno, o uniformar los riegos dentro de los lotes. La información adquirida, se acumula año a año, en un círculo virtuoso que permite ser cada vez más precisos, eficientes y lograr los máximos rendimientos.

2.1.5 Tecnologías Facilitadoras

La Agricultura de Precisión hace uso de distintas herramientas que facilitan su uso, haciendo de esta tecnología más robusta y confiable.

- Sistemas de posicionamiento global (GPS)
- Sistemas de Información geográfica (SIG)
- Percepción remota
- Tecnologías de dosis variables (sensores, controladores)
- Análisis de datos georeferenciados (geo-estadística, econometría espacial)

2.1.6 Ventajas y Beneficios Potenciales

La Agricultura de Precisión permite que los fertilizantes, pesticidas y el riego sean aplicados según las necesidades específicas de cada cultivo, en cada espacio determinado, en lugar de aplicarse por igual para todo el campo, reduciendo así la cantidad de insumos aplicados y por lo tanto ahorrando recursos. Éste enfoque mejora las estrategias de control de las enfermedades y plagas en los productos.

Es indispensable tener un control meteorológico en tiempo real como un instrumento para elegir el momento adecuado de la aplicación de plaguicidas, fertilizantes y agua para los cultivos según el estado del tiempo, los microclimas y las condiciones físico-químicas de los suelos. Dicho control nos permite recopilar datos, fundamento para crear modelos que permiten una previsión más exacta de los fenómenos meteorológicos, facilitando a la agro-industria y una mayor capacidad para predecir con precisión cuándo los insumos agrícolas se deben utilizar para control de plagas o cuándo es más conveniente regar o fertilizar.

Podemos determinar los siguientes beneficios potenciales:

- Optimización de la cantidad de agroquímicos aplicados
- Reducción de costos y contaminación ambiental
- Mejora en la calidad de las cosechas

Otro aspecto que beneficia al agricultor son tener un recuento de las prácticas agrícolas con sus respectivos resultados y de esta manera ayudarlo en la toma de decisiones.

2.1.7 Áreas de trabajo

Podemos definir las áreas que podrían ayudar al desarrollo de la Agricultura de Precisión:

- Desarrollo de sensores que permitan en tiempo real de forma eficiente y confiable la deficiencia nutricional o de estrés hídrico para la corrección en tiempo preciso.
- Desarrollo de dispositivos, programas de computación y estrategias que faciliten la integración, interpretación y análisis de datos o mapas.

2.1.8 Situación actual de la Agricultura de Precisión

Con respecto a Agricultura de Precisión, la forma más usada en la actualidad para sensar una determinada variable y obtener determinados datos del producto agrícola o del terreno, para su posterior análisis, es la telemetría.

Existen una gran variedad de elementos y sistemas que a lo largo de los años se han ido desarrollando con el objetivo de poder suplir la necesidad de cada tipo específico de aplicaciones.

En general y a grandes rasgos, el sistema funciona de la siguiente manera: Para comenzar se deberá hacer un estudio de suelos del sembrío. Según el resultado que arroje este estudio, se hará una división del mismo en unidades de medida o UM, posteriormente se hace un estudio del clima. Las prácticas de manejo del sistema de riego presente en todo el sembrío, determinarán que se varíe o no la distribución de las UMs, que en un caso ideal será independiente para cada UM. A lo largo de todo el sembrío se instalan estaciones de telemetría,

una por cada UM, las cuales tienen acopladas sondas y sensores que permiten medir las variables de interés.

Dichas estaciones de telemetría tienen una autonomía bastante grande y son programadas de modo que periódicamente hacen una medición de todos los sensores que tienen instalados y envían éstos datos instantáneamente a un data logger central instalado en algún lugar del sembrío. Esta transmisión de datos se puede dar por medio de un cable o vía wireless, en una sola dirección y por lo general de un solo salto, directamente hacia el data logger. Luego, el data logger se encarga de recibir la información de todas las estaciones de telemetría y almacenarlas en una memoria. En la actualidad, existen empresas que se dedican a brindar el servicio de extraer la información del data logger mediante una PC portátil para llevarla a su centro de análisis, de este modo, se hace un análisis de la información y se elabora un reporte para el productor en el que se detalla por ejemplo, los niveles de humedad de la tierra que ha obtenido en determinado periodo de tiempo en cada UM y se le dan una serie de recomendaciones basadas en dichos análisis.

La utilización de las técnicas de la Agricultura de Precisión presenta algunos inconvenientes:

- Acceso a la información limitada (equipo informático, conexión a Internet en las zonas rurales)

- Oferta reducida en entorno a las nuevas tecnologías (captadores de rendimiento, GPS)
- Falta de compatibilidad entre los materiales existentes (necesidades de normas comunes para el intercambio de datos)

Estas técnicas son cada vez más utilizadas en EE.UU., en el mercado Europeo, en Latinoamérica países como Argentina, Brasil y Chile ya las desarrollan, en nuestro país, en ciudades del Norte como Trujillo e Ica están en uso, en nuestra Región su uso es limitado. La Agricultura de Precisión es una vía cada vez más explorada, porque permite optimizar los rendimientos, administrar mejor los costes de producción y limitar el impacto de ciertas poluciones. El principio de la Agricultura de Precisión es aportar una buena dosis, en el correcto lugar y en el momento adecuado.

No obstante, los detractores sostienen que todavía no se ha demostrado el interés económico de la Agricultura de Precisión. El coste de los equipos informáticos y del software, asociado con el precio de un GPS y de un captador de rendimiento se acerca a los 15.000 euros. Esto corresponde al importe que debe desembolsar un agricultor para adquirir el material necesario para realizar el estudio de las diversidades sobre las tierras de su explotación. Además, la puesta en marcha de esta tecnología necesita datos muy costosos como fotos aéreas o de satélite.

Muy aparte del coste, el beneficio ambiental es difícilmente medible. La aplicación de conceptos de Agricultura de Precisión usualmente se considera relativa a la agricultura sostenible. Ésta pretende evitar la aplicación de las mismas prácticas a un cultivo, sin tener en cuenta las condiciones locales de suelo y clima y puede ayudar a evaluar situaciones locales de enfermedad.

2.2 ESTADO DEL ARTE

Las redes inalámbricas de sensores (WSN) son una evolución de las tradicionales redes de sensores, conformadas por dispositivos o nodos distribuidos, espaciados, autónomos utilizados para monitorear condiciones físicas o ambientales. En comparación de redes tradicionales, las redes de sensores manejarán con mayor exactitud sus tareas dependiendo de lo compacto que sea el despliegue y lo síncronas que estén.

Aquí se hacen muy importantes las cuestiones de facilidad de despliegue, gestión energética, miniaturización y autonomía. Dichos atributos generaron la idea de que dichos nodos se conviertan a futuro en el llamado polvo inteligente (Smart Dust). Las arquitecturas para WSN han evolucionado desde sus inicios y continúan evolucionando conforme las barreras técnicas van siendo superadas y por la demanda de aplicaciones cada vez más complejas.

Inicialmente, las WSN estaban formadas por unos pocos nodos homogéneos, en una única jerarquía que se encargaban de sensar en una región del espacio limitada una única variable del entorno, enviando las medidas a un nodo con función de sumidero de datos. Este nodo, podía ser capaz de intercambiar la información recibida con otro tipo de redes, posibilitando el análisis remoto del entorno abarcado por la red de sensores.

Posteriores desarrollos han requerido mayor número de nodos desplegados en la red, alcanzando la centena o hasta el millar de ellos. Esta demanda ha impulsado nuevas arquitecturas que soportan la explosión de nodos para que la transmisión sea eficiente. La forma más común de gestionar el incremento del número de nodos es la división en capas o en clústeres, en los que se incluyen varios nodos sumidero o routers. Cada cluster agrupa un conjunto de nodos que envían datos al maestro del cluster en lo que se conoce como comunicación intra-cluster, cuyo comportamiento es el de una WSN de una jerarquía. En niveles superiores, hay una comunicación inter-cluster para agrupar y procesar la información global, posibilitando la extracción de datos relevantes al exterior a través de otros medios de transmisión. Como consecuencia de estas nuevas topologías en capas, en paralelo, se han desarrollado nuevos algoritmos de comunicación complejos, que además deben ser eficientes desde un punto de vista energético.

La naturaleza de los nodos también ha evolucionado y los nuevos desarrollos incorporan nodos heterogéneos con diversidad de sensores y posibilidades de cómputo y comunicaciones. Así es posible realizar cálculos complejos en los nodos para minimizar la cantidad de información transmitida, aplicar algoritmos de agregación de datos e incluso de compresión.

Las Aplicaciones de WSN han tenido un crecimiento considerable debido a la necesidad de monitorear dichas variables de una manera menos invasiva. Por otro lado, las aplicaciones WSN representan un problema distribuido, que tradicionalmente se ha resuelto de manera centralizada (cliente- servidor), junto con las bondades y deficiencias que ello acarrea en el análisis o toma de decisiones a partir de los datos obtenidos en la red de sensores.

A partir de éstos desarrollos han surgido un sinnúmero de tecnologías de comunicación inalámbrica con la idea de ser aplicadas en éste campo. Algunas de éstas son: IEEE 802.15: 6LowPan, Zigbee, Bluetooth, NFC, HomeRF, WirelessHART, MiWi, entre otros, además de la utilización de algunas ya existentes, como WiFi, WiMAX y redes celulares. Entre éstas, la tecnología más utilizada en el ambiente de consumo e industrial es ZigBee, que se ubica sobre el estándar 802.15.4 de IEEE.

IEEE 802.15.4, es un estándar que especifica la capa física y el control de acceso al medio (enlace de datos) a redes de área personal de tasas bajas de transmisión (LR-WPANs), es mantenido por el grupo de trabajo de la IEEE 802.15.

Las ventajas de LR-WPAN son su facilidad en la instalación, fiabilidad en la transmisión de datos, costo reducido y poco consumo de energía manteniendo un protocolo simple y flexible.

Éste estándar es la base para la especificación Zigbee, WirelessHART (SmartDust), MiWi (microchip), entre otros. Dichos estándares desarrollan una solución completa de red en las capas superiores que no cubre el estándar.

En particular en el caso de la agricultura los sensores nos brindan información de un sin número de variables como por ejemplo la humedad y el pH de la tierra, la humectación de las hojas, la temperatura, la humedad relativa del aire, etc. Sin embargo, hay fenómenos que no pueden ser medidos directamente por sensores pero que pueden ser proveídos mediante una conjugación de la información obtenida por éstos, por ejemplo, una plaga, una baja producción, baja calidad de los productos, etc. Para poder anticiparnos tanto a las variaciones directas como las indirectas necesitamos tener la información apropiada en el momento apropiado. Ante esto planteamos a las redes de sensores como una alternativa frente a la falta de información en el momento adecuado para su uso en la Agricultura.

Finalmente, los avances tecnológicos que se producirán en lo relativo a almacenamiento de energía, potenciarán el empleo de nodos cada vez más complejos, con mayor capacidad de transmisión, lo que hará rebajar las restricciones inherentes a las WSN. De acuerdo con esto, actualmente se está investigando en lo que se conoce como Wireless Multimedia Sensor Networks (WMSN), en las que se permite el envío de imágenes, vídeo y audio, donde los nodos intermedios, de gran potencia de cálculo, aplican complejos algoritmos de compresión y agregación.

2.3 ESTRUCTURA DE LA RED INALÁMBRICA DE SENSORES

2.3.1 Características de la WSN

2.3.1.1 Protocolos 802.15.4 - ZigBee

a) Protocolo 802.15.4

El protocolo 802.15.4 viene a ser un estándar para Comunicaciones Inalámbricas, creado por el Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (IEEE) el mismo que ha creado otros estándares de comunicaciones, como el IEEE 802.11 que se refiere a comunicaciones wireless LAN y el 802.16 para redes wireless de área metropolitanas (MAN).

Mientras que los referidos estándares fueron diseñados para aplicaciones con alto consumo de ancho de banda, el protocolo 802.15.4 fue desarrollado para manejar tasas de transmisión bajas utilizando aplicaciones con baterías y conectividad sencillas.

Las especificaciones del estándar 802.15.4 definen la comunicación en las bandas (Industrial Scientific and Medical – ISM) 868-868.8 MHz, 902-928 MHz o 2.400-2.4835 GHz. A pesar de que se pueden usar cualquiera de estas bandas, la 2.4 GHz es la más popular puesto que está abierta en la mayoría de países del mundo. La 868 MHz está especificada principalmente para uso Europeo y la 902-928 MHz solo podría usarse en Estados Unidos, Canadá y algunos otros países que aceptan las regulaciones de la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC).

De acuerdo al estándar 802.15.4 las comunicaciones se deben realizar en canales de 5 MHz con un rango entre 2.405 y 2.480 GHz. En la banda de 2.4 GHz se especifica una tasa máxima de transmisión de 250 kbps, pero debido a la sobrecarga del protocolo la máxima tasa teórica actual es aproximadamente la mitad de 250 kbps.

Aunque el estándar marca 5 MHz por canal, solo 2 MHz de este se consumen con el ancho de banda ocupado. Haciendo uso de los 2.4 GHz, el protocolo 802.15.4 especifica el uso de Espectro Ensanchado Por Secuencia Directa (DSSS) y usa una Modulación por Desplazamiento de Fase (QPSK desplazada) con pulso semisenusoidal para modular la portadora de RF. En las figuras 2.2 y

2.3 se muestra el espectro de los canales especificado por el IEEE 802.15.4 y la estructura de los mismos. En la tabla 2.1 se especifica la frecuencia de los canales del IEEE 802.15.4.

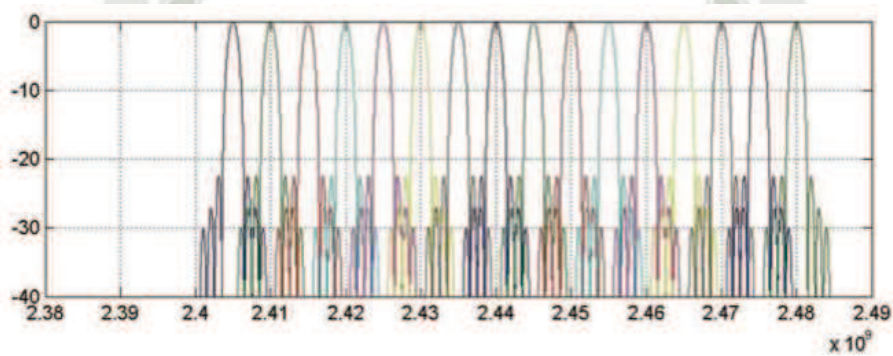


Figura 2.2: Espectro de canales del IEEE 802.15.4

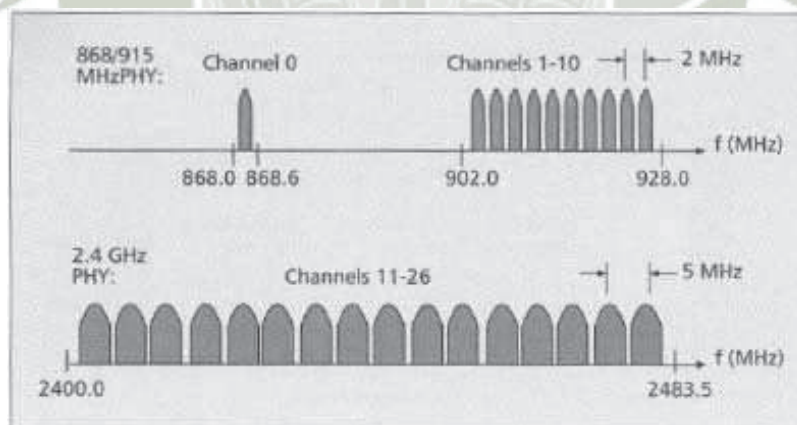


Figura 2.3: Estructura de canales del IEEE 802.15.4

| Channel Number | Channel Center Frequency (MHz) |
|-------------------------|--------------------------------|
| $k = 0$ | 868.3 |
| $k = 1, 2, \dots, 10$ | $906 + 2(k - 1)$ |
| $k = 11, 12, \dots, 26$ | $2405 + 5(k - 11)$ |

Tabla 2.1: Frecuencia de los canales del IEEE 802.15.4

El estándar 802.15.4 posibilita comunicaciones con diferentes topologías como son las punto a punto, punto multipunto, estrella, árbol. Una de las aplicaciones más comunes sería con una topología en estrella, con un coordinador central y nodos remotos o nodos finales.

b) ZigBee

ZigBee es el protocolo que utiliza como base el estándar 802.15.4 y agrega funcionalidades de routing y redes. Ha sido elaborado para añadir el mallado de red (mesh networking) a la capa de radio 802.15.4. Este mallado se utiliza en aplicaciones cuyos rangos entre dos puntos alcanzan distancias muy extensas, pero en los que otros radios intermedios podrían reenviar cualquier mensaje a la radio deseada.

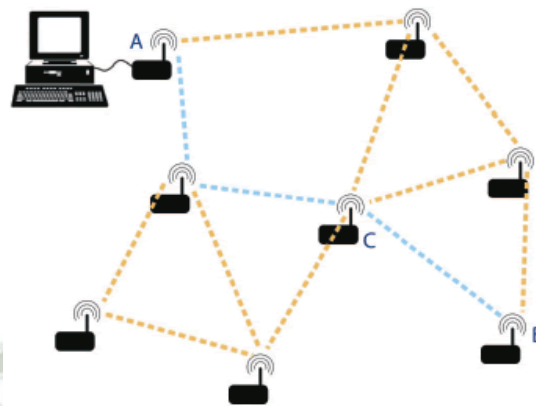


Figura 2.4: Comunicación ZigBee entre nodos

En la figura 2.4, en el caso de que el punto A desee transmitir datos al punto B pero la distancia es demasiado grande, el mensaje podría ser transmitido a través del punto C y otros dispositivos hasta alcanzar su destino.

El protocolo ZigBee está diseñado para que en situaciones como el de la figura 2.4 donde se involucran diversos nodos, la red se pueda formar sin necesidad de interacción del usuario. El protocolo ZigBee se encargará de los reintentos de envío, de las confirmaciones de recepción (ACKs) y del enrutamiento de mensajes, dando la opción de cambiar de caminos en caso de falla de algún nodo que se usase como tránsito de los mensajes.

Los dispositivos que hacen uso de ZigBee pueden ser dispositivos finales, routers o coordinadores. Ya que ZigBee ha sido desarrollado para las aplicaciones de bajo consumo, se adecua a los sistemas embebidos y aquellos mercados

donde la disponibilidad y versatilidad son importantes pero no para los que necesiten grandes anchos de banda.

En la tabla 2.2 se realiza una comparación de funcionalidades y aplicaciones con otras tecnologías inalámbricas. Para poder seleccionar una de ellas debemos tener en cuenta principalmente la potencia, el rango de cobertura y la tasa de transmisión.

| | ZigBee and 802.15.4 | GSM/GPRS CDMA | 802.11 | Bluetooth |
|-------------------------|----------------------------|--------------------------|---------------------|---------------------|
| Aplicación | Monitoring and Control | Wide Area Voice and Data | High-Speed Internet | Device Connectivity |
| Vida de Baterías | Years | 1 Week | 1 Week | 1 Week |
| Ancho de banda | 250 Kbps | Up to 2 Mbps | Up to 54 Mbps | 720 Kbps |
| Rango Típico | 100 + meters | Several Kilometers | 50-100 Meters | 10-100 Meters |
| Ventajas | Low Power, Cost | Existing Infrastructure | Speed, Ubiquity | Convenience |

Tabla 2.2: Comparación de tecnologías de RF

Las s tasas bajas de transmisión de ZigBee permiten una mayor sensibilidad y cobertura, pero ofrece una menor velocidad. Las principales ventajas de ZigBee son la habilidad de ofrecer baja potencia y una vida de batería extensa ideales para las redes de sensores.

En el mercado podemos encontrar los módulos Digi XBee y XBee-PRO 802.15.4 que ofrecen comunicaciones punto a punto y los módulos XBee ZNet 2.5 que proveen de la capacidad de implementación de redes mesh ZigBee. Existen esencialmente dos tipos de algoritmos de routing usados en las redes ZigBee, AODV (Ad Hoc On Demand Distance Vector Routing) y el algoritmo basado en árbol.

Como se aprecia la figura 2.5, el estándar define el hardware y software de las capas físicas (Phy) y media Access control (MAC). Cada una de estas capas es responsable de una serie de funcionalidades necesarias para la comunicación y ZigBee añade otras capas por encima de 802.15.4.

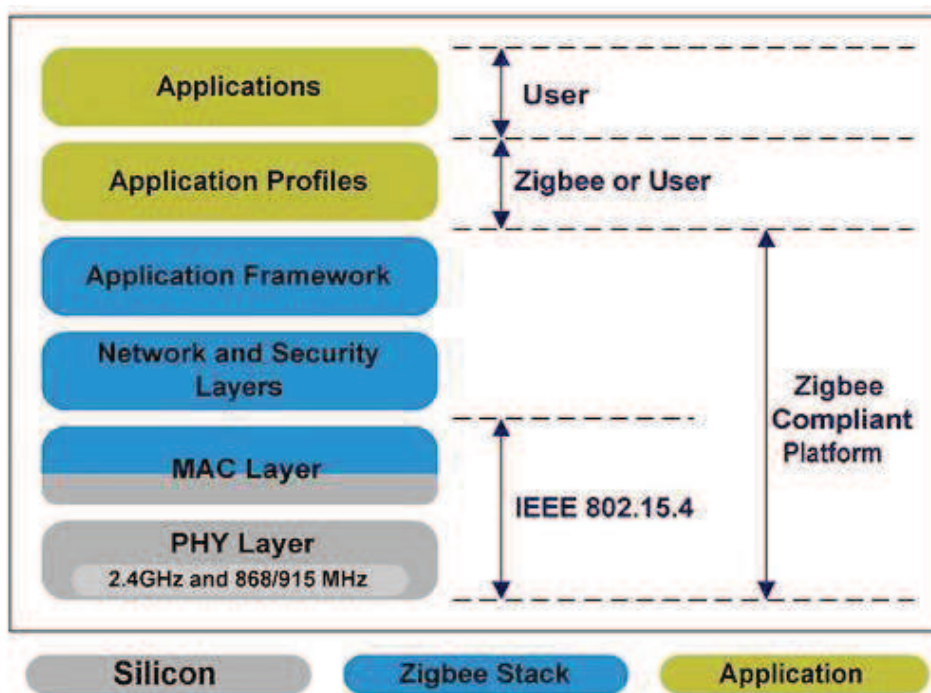


Figura 2.5: ZigBee y 802.15.4

2.3.1.2 Escalabilidad y Topología de red

Las redes ZigBee son capaces de soportar y utilizar diferentes diseños y topologías. Como sabemos las topologías nos indican como las radios se conectan lógicamente unas con otras. Debemos tener en cuenta que las redes punto a punto y las mallas presentan ciertas peculiaridades que harán que sus diseños sean un poco complejos. Tenemos principalmente cuatro tipos de topologías:

a) Punto a Punto (Pair)

Es la topología de red más sencilla presenta sólo dos nodos. Uno de estos nodos deberá ser el coordinador o central para que la red se pueda formar. El otro dispositivo podría estar configurado como nodo router o dispositivo final.

b) Estrella (Star)

En esta topología un nodo Coordinador es el centro de la red y conecta con un círculo de nodos o dispositivos finales como una forma de estrella. Todos los mensajes pasan por el Coordinador que enrutará estos mensajes según las necesidades de los dispositivos, cabe mencionar que entre los dispositivos finales no existe comunicación directa.

c) Mallado (Mesh)

La topología en malla emplea nodos routers como complemento del coordinador. Éstos pueden pasar los datos a otros routers y dispositivos finales según sea necesario.

Los dispositivos finales pueden unirse a cualquier router o coordinador. Estos pueden generar y recibir información pero necesitan a sus nodos centrales para comunicarse con otros nodos. En redes ZigBee no es posible implementar redes

totalmente malladas, para ello habría que hacer uso de protocolos del tipo DigiMesh.

d) **Árbol con Clústers (Cluster Tree)**

Este tipo de topología es similar a la topología tipo malla, los nodos router forman un centro de clases con los nodos o dispositivos finales que se encuentren alrededor de éstos.

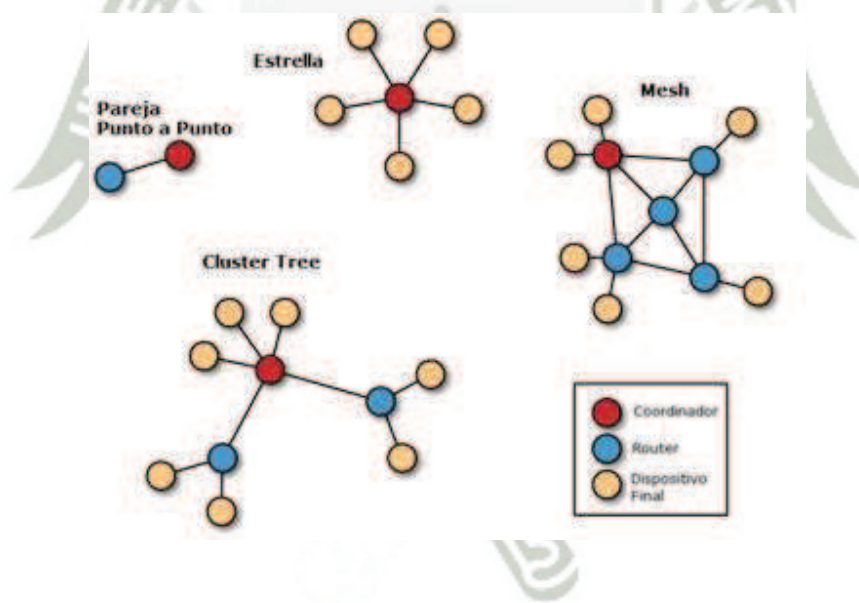


Figura 2.6: Tipos de Topologías en redes WSN

2.3.1.3 Gestión de recursos y energía

a) Fuentes de alimentación en nodos con sensores

En los nodos inalámbricos la fuente de energía es un elemento muy importante, debemos considerar dos aspectos muy cruciales, uno de ellos el almacenamiento de energía con su respectivo suministro en la forma requerida y luego, ver de qué forma se podría recargar la batería consumida. El almacenamiento de energía se ha estado llevando a cabo mediante el uso de baterías recargables.

b) Baterías

Con respecto a la energía que utiliza el sensor, la forma más común es el uso de baterías, tanto no recargables (baterías primarias) o si el dispositivo utiliza algún mecanismo de recarga por medio de elementos externos, recargables (baterías secundarias), ver tabla 2. 3.

| Baterías Primarias | | | |
|------------------------------|-----------|-------|----------|
| Química | Zinc-aire | Litio | Alcalina |
| Energía (J/cm ³) | 3780 | 2880 | 1200 |
| Baterías Secundarias | | | |
| Química | Litio | NiMHd | NiCd |
| Energía (J/cm ³) | 1080 | 860 | 650 |

Tabla 2.3: Clasificación baterías

c) Aprovechamiento de la energía ambiente

Se va hacer uso de Energía limpia o Energía Renovable, para suministrar la energía necesaria para los nodos de la red inalámbrica. Entre las diferentes opciones se escogerá la Fotovoltaica por sus potenciales características que se adecuan a nuestra red y su entorno.

La energía disponible dependerá de la hora del día entre otros factores. Por ejemplo, podemos encontrar paneles que pueden proporcionar 4V u 8V y una corriente de 310mA.



Figura 2.7: Panel Solar 8 V

d) Consumo en elementos de la red inalámbrica

Según los Datasheets de los elementos de la red inalámbrica el consumo de los mismos cuando están activos bordean los 40mA, posteriormente se hará un breve análisis del consumo de los elementos de la red inalámbrica.

e) Consumo en Memoria

Las memorias más destacadas son las de chip del microcontrolador y las FLASH, la potencia necesaria para la memoria en chip está generalmente incluida en la información del consumo de potencia dado para el microcontrolador.

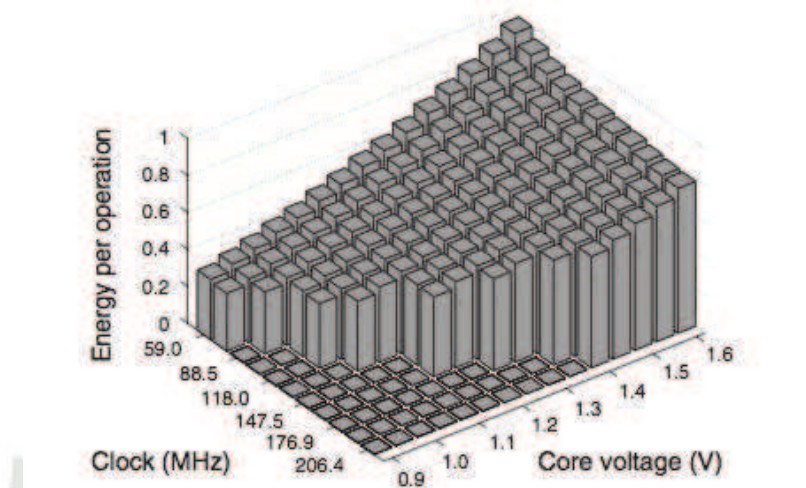


Figura 2.8: Consumo de energía por operación

f) Consumo de potencia de sensores

En algunos casos el consumo se podría llegar a ignorar en comparación con otros dispositivos (un sensor de temperatura puede llegar a consumir entre 0.01 y 0.2 mA).

El consumo dependerá además del número de sensores y de actuadores si son necesarios y del muestreo necesario, así mismo, habrá que tener en consideración que no solo la comunicación sino también el procesamiento de los datos harán que este consumo se incremente.

El estudio y elección de los mismos está fuera del alcance de nuestro proyecto de tesis.

2.3.2 Aplicación en el sector agrario

Las redes inalámbricas de sensores con aplicación en la agricultura de precisión pueden efectuar una variedad de tareas como son:

- El monitoreo de parámetros en tiempo real.
- La localización de los sectores o puntos donde se recogen los parámetros.
- La transmisión de datos desde el terreno de cultivo hasta el nodo coordinador o estación base.

Las medidas de parámetros podrían comprender desde la humedad ambiental, temperatura, la humedad de suelo, los niveles de pesticidas, el pH del terreno entre otras, de tal forma que permitan mejorar la producción y la prevención de plagas u otros factores que afecten el cultivo.

2.3.3 Arquitectura Hardware de la WSN

2.3.3.1 Controlador versus microprocesador: ATMEL ATmega 328P

El controlador es el núcleo del nodo inalámbrico con sensor. Se encarga de recoger los datos de los sensores, procesar la información, cuándo y dónde enviarla, recibe información de otros nodos sensores y decide sobre el comportamiento de los actuadores. Se encarga de los protocolos de comunicación

y del reparto de tiempos de CPU entre los distintos procesos para lo que existen diferentes arquitecturas. Tenemos procesadores comunes los cuales presentan un consumo de energía excesivo. Para ello existen procesadores más sencillos que conocidos como microcontroladores, los cuales son ideales para redes inalámbricas puesto que ofrecen la posibilidad de reducir su consumo al utilizar el modo Sleep.

Disponemos también de procesadores programables llamados DSP (Digital Signal Processor), utilizados específicamente para hacer frente a grandes cantidades de datos vectoriales, en los casos de aplicaciones para el procesamiento de señal. En redes inalámbricas su uso es apropiado y está ampliamente probado, pero en el caso de las WSN, los requerimientos en las comunicaciones inalámbricas son por lo general mucho más sencillos.

Existe también la opción de utilizar FPGA, dispositivos que pueden ser reprogramados en campo, sin embargo nos tomará tiempo y energía por ende no resulta práctico reprogramar FPGA's en la misma frecuencia que el microcontrolador.

Disponemos también de ASICs, que son procesadores especializados para aplicaciones concretas de gran velocidad. Poseen una mejor eficiencia y funcionamiento pero perderían tolerancia . Sin embargo, las ASICs proveen la misma funcionalidad a nivel de hardware, por lo que aumentarían los costes de

desarrollo de hardware. Para una aplicación de redes inalámbricas de sensores donde las tareas de los sensores siempre serán las mismas durante su ciclo de vida y donde el número de nodos es lo suficientemente grande como para asegurar que la inversión en ASICs pudiera ser una solución por encima de la necesidad real.

En la fase actual del desarrollo de la tecnología WSN, la flexibilidad y la facilidad de uso de los microcontroladores hacen que estos sean preferibles para este tipo de soluciones.

Por ello, se escoge a los microcontroladores como una solución para este proyecto de tesis, utilizaremos la Atmel ATmega 328P, que viene integrada en las placas Arduino UNO en las que se basa este proyecto, ya que proporcionan las funcionalidades y características necesarias y a un costo aceptable y disponibilidad en el mercado.

2.3.3.2 Memoria

Para almacenar lecturas de sensores, nodos intermedios y paquetes de otros nodos se utilizará la memoria de Acceso Aleatorio (RAM). Su principal ventaja es la velocidad, se trata de una memoria rápida, pero cuenta con la desventaja de que pierde toda la información almacenada si la fuente de alimentación se interrumpe. El código de la aplicación se podrá almacenar en la memoria de solo lectura (ROM), o más típicamente en la ROM programable y

memoria flash, esta sirve como almacenaje intermedio en caso de que la corriente de la RAM debe apagarse por un tiempo, aunque se tendría que tener en cuenta el retraso en la lectura y escritura de datos en la memoria flash así como un mayor consumo de energía, por lo que una correcta elección de memoria RAM es crucial para un normal funcionamiento y larga duración de la aplicación.

2.3.3.3 Medio de transmisión

Para poder realizar una comunicación inalámbrica entre dispositivos, lo primero que se debe elegir es el medio de transmisión, entre las cuales tenemos: radio frecuencia, comunicaciones ópticas y ultrasonido. De todas estas alternativas, la radio frecuencia (RF) es la más destacada ya que es la que mejor se adapta a las necesidades de la mayoría de las aplicaciones de redes inalámbricas de sensores. Además nos proporciona rangos relativamente grandes al igual que tasas de transferencias bajas y un bajo consumo de energía.

2.3.3.4 Transceptores

El transceptor es un dispositivo que tiene dos funcionalidades integradas el de ser transmisor y receptor, este dispositivo es requerido en nodos con sensores. Su tarea principal es la de convertir una transmisión de bits proveniente de un microcontrolador y convertirlo a ondas de radio.

Normalmente se trata de una comunicación en modo semi-duplex, lo que significa que pueden enviarse señales en ambos sentidos, es bidireccional, pero no simultáneamente.

2.3.3.4.1 Características de los transceptores

Los transceptores se pueden dividir en dos partes importantes:

- El terminal de radiofrecuencia el cual se encarga de procesar las señales analógicas.
- El procesador de banda base que al igual que el caso anterior procesa señales pero digitales.

Entre estas dos partes se lleva a cabo una conversión de frecuencias, de manera directa o a través de una o varias frecuencias intermedias. El límite entre los dominios analógicos y digitales está constituido por los conversores Digital/Analógico y Analógico/Digital.

En la figura 2.9 tenemos a los elementos de la arquitectura del terminal de RF:

- El amplificador de potencia (PA) recibe las señales convertidas desde la banda base y las amplifica para transmitir las por la antena.

- El amplificador de bajo ruido (LNA) se encarga de amplificar las señales que ingresan hasta niveles aceptables para el procesamiento, sin reducir de manera significativa la relación señal ruido (SNR).
- Otros elementos como los osciladores locales y mezcladores se usan para la conversión de frecuencias desde el espectro de Radio Frecuencia a frecuencias intermedias o banda base.

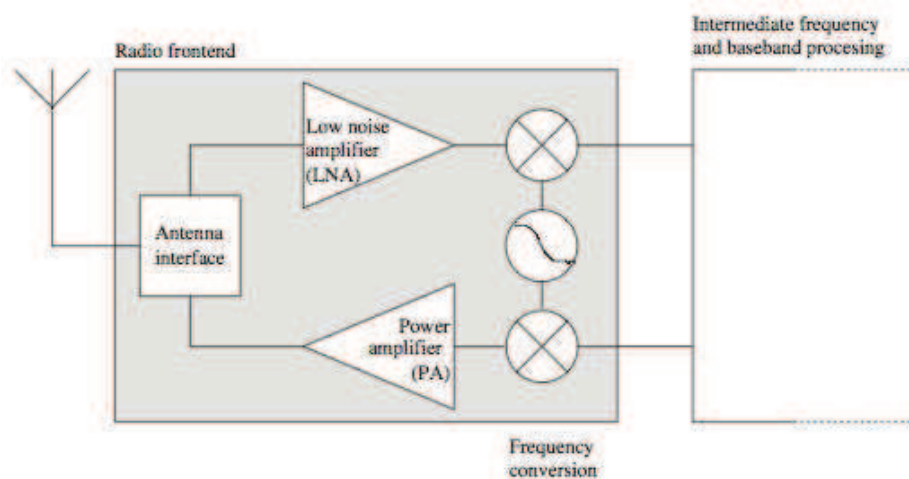


Figura 2.9: Estructura de un transceptor

2.3.4 Elementos de la WSN

Nuestra solución que está basada en el protocolo ZigBee va a disponer de tres elementos con distintas funciones: un nodo Coordinador, nodos Routers que

encaminara los datos recogidos de los sensores y los nodos Finales que también van a conectar los sensores distribuidos con nuestra red inalámbrica, solo que poseen además la función de sleep para ahorro de energía.

La arquitectura de Hardware va a ser igual en los tres nodos, aunque no es la única solución posible se ha decidido así para facilitar el diseño y los costos puesto que cumple de igual manera con los requisitos de nuestra red.

2.3.4.1 Arduino UNO R3

Se utilizará el Hardware Arduino UNO R3 para cada nodo y será el punto de conexión de los sensores a usar, ver figura 2.10.

El Arduino es una placa microcontroladora basada en el ATmega328P. Posee 14 pines digitales de entrada/salida (6 pueden ser usados como salidas PWM), 6 entradas analógicas, un cristal 16 MHz, una conexión USB, un conector de potencia, una cabecera ICSP y un botón de reset.

Presenta también las siguientes características:

- Voltaje operacional: 5 V
- Voltaje de entrada (recomendado): 6 - 12V
- Voltaje de entrada (límite): 6 - 20V
- Corriente DC por Pin I/O: 40mA
- Corriente DC para Pin 3.3V: 50mA

- Memoria Flash: 32 KB, 0.5 KB de los cuales son para el Bootloader
- SRAM: 2KB
- EEPROM: 1KB
- Velocidad de reloj: 16 MHz



Figura 2.10: Arduino UNO con controlador ATmega328p

El Hardware Arduino Uno posee gran comodidad para lograr establecer comunicación con una PC, otro Arduino u otro microcontrolador. El controlador ATmega328 tiene comunicación Serial a través de UART TTL (5V) usando los pines 0 (RX) y 1 (TX). El software de Arduino posee un monitor serial por el medio

del cual podemos realizar y observar la transmisión y recepción de datos. La programación de Arduino se realiza mediante el software de Arduino que es de uso libre y de código abierto. El diagrama esquemático de Arduino UNO lo podemos ver en el ANEXO I.

2.3.4.2 XBee Shield – Módulo para RF

El XBee Shield da la posibilidad a Arduino de comunicarse de manera inalámbrica usando ZigBee. Su estructura física hace que se pueda conectar sobre Arduino fácil y rápidamente. Se puede utilizar como alternativa para la conexión Serial a USB y se puede poner en modo comandos para configurarlo de distintas formas, el diagrama esquemático se encuentra en el ANEXO I.

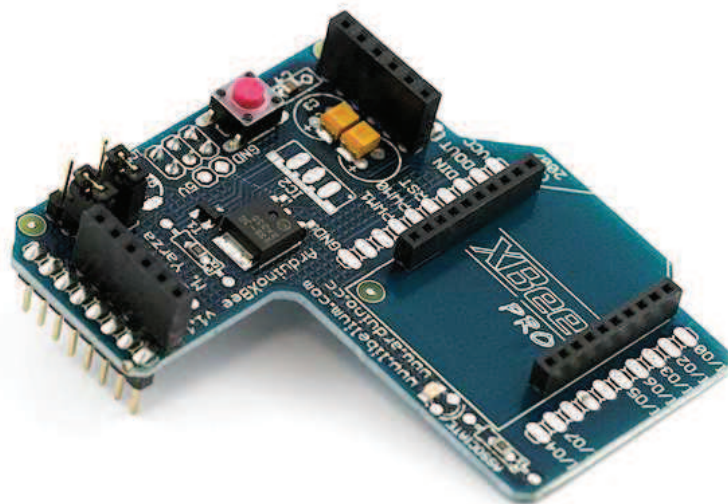


Figura 2.11: XBee Shield

El módulo XBee Shield lleva en su estructura dos jumpers, los mismos que van a determinar como la comunicación serial de XBee se va a conectar con la comunicación serial entre el controlador y Arduino UNO.

Utilizando los jumpers en la posición Xbee el Pin DOUT del módulo XBee se conecta al pin RX del microcontrolador y el pin DIN se conecta a TX. Los pines RX y TX del microcontrolador siguen conectados a los pines de TX y RX del chip FTDI (los datos que se transmiten desde el microcontrolador son enviados a la PC vía USB al mismo tiempo que se envían a través del módulo XBee), sin embargo, el microcontrolador solo será capaz de recibir datos del módulo XBee y no desde el USB de la PC.

Utilizando los jumpers en la posición USB el Pin DOUT del módulo XBee se conecta con el pin RX del chip FTDI, y el DIN del módulo XBee se conecta con el pin TX del chip FTDI. Esto quiere decir que el módulo XBee logra comunicarse directamente con la PC, pero esto solo funciona si el microcontrolador se retira de Arduino UNO, si el microcontrolador se mantiene en la placa éste podría hablar con la PC mediante USB pero ni la PC ni el microcontrolador podrían comunicarse con el módulo XBee.

2.3.4.3 Módulo XBee Series 2 - 2mW

El módulo de radiofrecuencia de Maxstream - Digi internacional de la versión 2, mejora notablemente la potencia de salida y el protocolo de comunicación. Utiliza el estándar IEEE 802.15.4 que es la base de ZigBee y hace que se pueda manejar el módulo mediante un simple puerto serial (UART). Soporta topologías punto a punto como redes multipunto. En nuestro caso usaremos estos módulos para proporcionar la capacidad necesaria para crear una red tipo estrella, ya que posee características adecuadas, ver ANEXO II.

La versión 1 y la versión 2 tienen los mismos pines, sin embargo, las versiones 1 no pueden comunicarse con las versiones 2. Se recomienda el uso en parejas de módulos de la serie 2, ver Tabla 2.4.

| | XBee Serie 1 | XBee Serie 2 |
|--|--|--|
| Rango Interior / Urban Range | hasta 100 pies (30m) | hasta 133 pies (40m) |
| Rango Exterior RF línea de vista | hasta 300 pies (100 m) | hasta 400 pies (120m) |
| Salida de Potencia de transmisión | 1 mW (0 dBm) | 2 mW (+3 dBm) |
| RF Data Rate | 250 Kbps | 250 Kbps |
| Sensibilidad del receptor | -92 DBm (1% PER) | -98 DBm (1% PER) |
| Voltaje de alimentación | 2.8 a 3.4 V | 2.8 a 3.4 V |
| Corriente de funcionamiento (Transmisión) | 45 mA (@ 3.3 V) | 40 mA (@ 3.3 V) |
| Corriente de funcionamiento (Recepción) | 50 mA (@ 3.3 V) | 40 mA (@ 3.3 V) |
| Corriente de apagado | 10 uA | 1 uA |
| Frecuencia | ISM 2,4 GHz | ISM 2,4 GHz |
| Dimensiones | 2.438 cm x 2.761 cm | 2.438 cm x 2.761 cm |
| Temperatura de funcionamiento | -40 A 85 °C | -40 A 85 °C |
| Opciones de Antena | PCB, integrado Whip, U.FL, RPSMA | PCB, Integrado Whip, Chip, Conector U.FL |
| Topologías de red | Punto a punto, estrella, malla (con DigiMesh firmware) | Punto a punto, estrella, malla |
| Número de canales | 16 Canales de secuencia directa | 16 Canales de secuencia directa |
| Opciones de filtración | PAN ID, canales y origen / destino | PAN ID, canales y origen / destino |

Tabla 2.4: Comparación de características Xbee Serie 1 y Serie 2

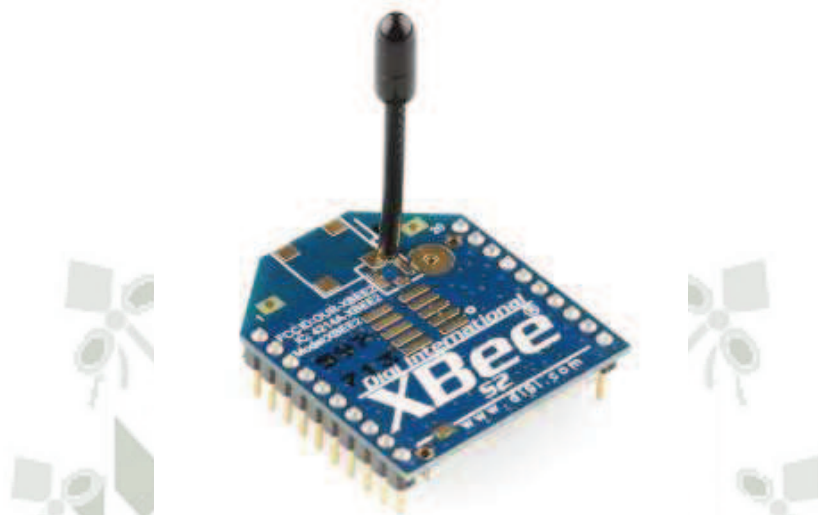


Figura 2.12: Módulo RF XBee Serie 2

Cada nodo de la red inalámbrica con su respectivo modulo XBee S2 con antena incorporada pero sin sensores quedaría como se muestra en la Figura 2.13.

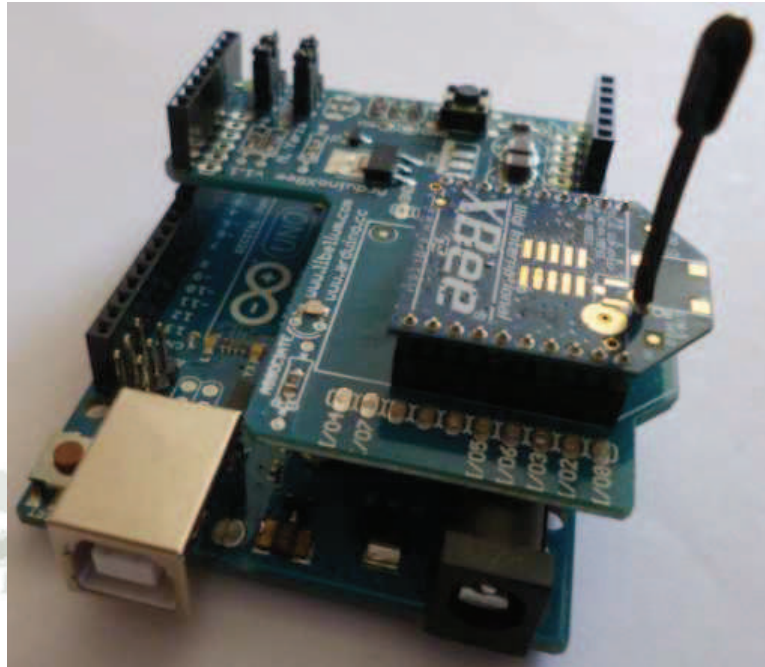


Figura 2.13: Hardware Arduino Uno con Shield XBee y módulo XBee S2

Tenemos a Arduino UNO, adherido a este en un segundo nivel tenemos el Shield XBee, y por último y en un tercer nivel se encuentra el módulo XBee S2 con antena tipo Wire.

2.3.4.4 Dispositivo final (End Device)

En estos nodos se van a conectar los sensores o actuadores como electroválvulas para el control de riego, en la Figura 2.14 se observa la conexión entre los elementos del nodo final.

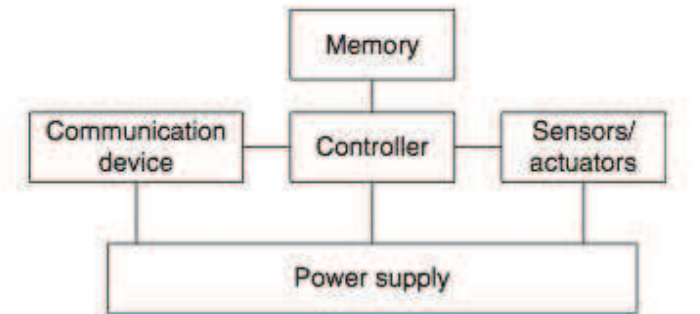


Figura 2.14: Diagrama elementos en nodo final

Los nodos finales presentan las siguientes características según su participación en la red inalámbrica:

- Antes de transmitir o recibir datos deben unirse a una red ZigBee.
- No pueden permitir que otros nodos finales se comuniquen con ellos.
- Siempre debe transmitir y recibir datos hacia su coordinador.
- No puede encaminar datos.
- Puede dormir entrando estado en modo sleep, para ahorro de consumo.

Estos nodos tienen el menor consumo dentro de la red inalámbrica por ello hacen que los costos se reduzcan considerablemente.

2.3.4.5 Nodo Router

Los nodos routers tienen la capacidad de encaminar los datos que envían los nodos finales. Además poseen las siguientes características:

- Antes de poder transmitir, recibir o encaminar datos deben unirse a una red ZigBee
- Una vez unidos, puede permitir que otros routers o nodos finales se unan a la red.
- No pueden dormir modo sleep, por lo que siempre deben estar activos.

2.3.4.6 Nodo Coordinador

Es indispensable que exista un nodo Coordinador, para poder inicializar la red, en nuestro proyecto el nodo Coordinador funcionara también como Estación Base, donde almacenara los datos transmitidos desde los sensores. El nodo Coordinador posee las siguientes características:

- Selecciona el canal y el ID PAN (64 bit o 16 bit) para iniciar la red.
- Puede permitir que routers y nodos finales se unan a la red.
- Puede asistir en el encaminamiento de datos.
- Tiene prohibido dormir o entrar en estado Sleep.

El protocolo ZigBee trabaja en la banda de 2.4GHz utiliza 16 canales. La frecuencia de canal se define con el parámetro Channel o canal y es seleccionada como se hace mención arriba por el Coordinador, el canal seleccionado deber ser el mismo para los demás elementos de la red inalámbrica.

| Channel Number | Frequency |
|-------------------|-------------------|
| 0x0B – Channel 11 | 2,400 – 2,405 GHz |
| 0x0C – Channel 12 | 2,405 – 2,410 GHz |
| 0x0D – Channel 13 | 2,410 – 2,415 GHz |
| 0x0E – Channel 14 | 2,415 – 2,420 GHz |
| 0x0F – Channel 15 | 2,420 – 2,425 GHz |
| 0x10 – Channel 16 | 2,425 – 2,430 GHz |
| 0x11 – Channel 17 | 2,430 – 2,435 GHz |
| 0x12 – Channel 18 | 2,435 – 2,440 GHz |
| 0x13 – Channel 19 | 2,440 – 2,445 GHz |
| 0x14 – Channel 20 | 2,445 – 2,450 GHz |
| 0x15 – Channel 21 | 2,450 – 2,455 GHz |
| 0x16 – Channel 22 | 2,455 – 2,460 GHz |
| 0x17 – Channel 23 | 2,460 – 2,465 GHz |
| 0x18 – Channel 24 | 2,465 – 2,470 GHz |
| 0x19 – Channel 25 | 2,470 – 2,475 GHz |
| 0x1A – Channel 26 | 2,475 – 2,480 GHz |

Tabla 2.5: Relación canales y frecuencias

El nodo Coordinador tiene que cumplir doble función con respecto a la conectividad ya que tendrá que ser capaz de proporcionar conexión mediante ZigBee y también deberá transferir la información recogida por los sensores a una Estación Base.

ZigBee es el protocolo usado para la comunicación entre radios. Estos usan de manera simultánea el serial TTL para comunicar por cable con otros dispositivos locales, como el microcontrolador y una PC. Todo lo que ocurre en los pines de RX y TX está usando el serial TTL. En la parte interna del XBee y el software se realiza la traducción entre estos dos protocolos ZigBee y TTL.

Tenemos también que algunos módulos Gateway están disponibles para conectar desde las comunicaciones seriales TTL. En muchos casos se procede conectando la TX/RX del módulo XBee directamente a la RX/TX del otro módulo embebido y por ello se crea un Gateway entre ambos protocolos siempre y cuando el otro dispositivo esté correctamente configurado para retransmitir transparentemente.

2.3.5 Módulo XBee S2 y antenas

2.3.5.1 Hardware XBee

a) Hardware XBee Series 1

Estos módulos usan un microchip Freescale para dotar de comunicaciones simples y basadas en el estándar punto-punto. Se descartan este tipo módulos en el presente proyecto puesto que no cumplen con los requerimientos del mismo.

b) Hardware XBee Series 2

Los módulos XBee Series 2 usan un microchip de Ember Networks que poseen nuevas alternativas basadas en estándares ZigBee para redes malladas. El mallado de redes es la base para crear redes de sensores robustas, son los sistemas que pueden generar grandes grupos y cantidades de datos y soportar las interacciones en escala humana.

La Serie 1 como la Serie 2 de XBee poseen dos tipos diferentes de transmisión de potencia, la normal (o regular) y la PRO. Para este proyecto se utilizarán módulos de la Serie 2 normal ya que estos cumplen con las expectativas deseadas a un menor costo y menor consumo de energía.

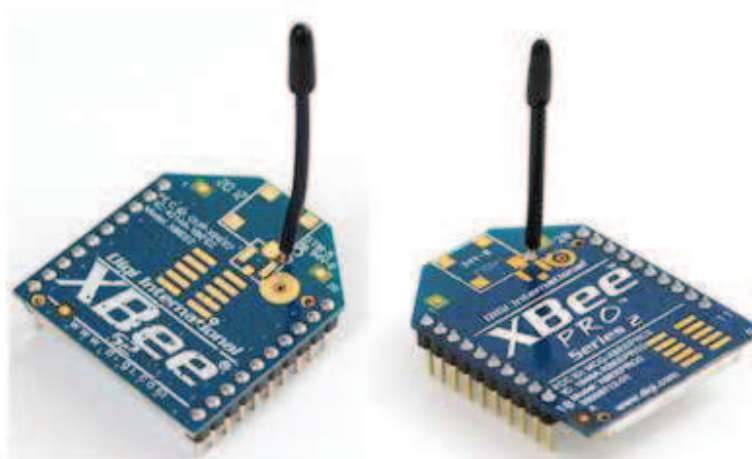


Figura 2.15: Módulo XBee Serie 2 y Módulo XBee PRO Serie 2

A continuación en la figura 2.16 se muestra el conexionado del módulo XBee con el microcontrolador.

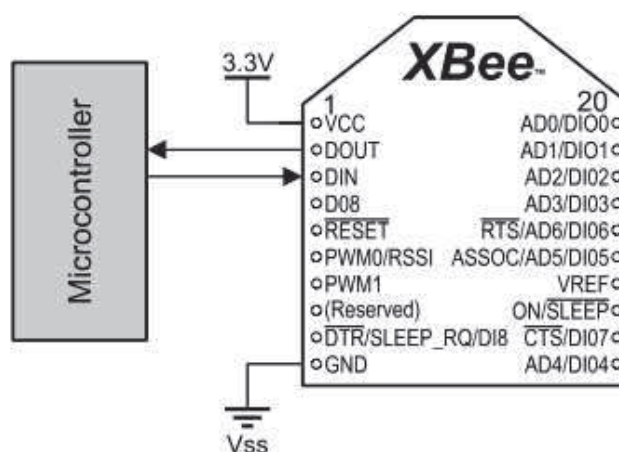


Figura 2.16: Conexión Microcontrolador con módulo XBee

2.3.5.2 Antenas

a) Antena cableada o Whip (Wire)

Este tipo de antena es un tipo de cable unido al módulo XBee no es de gran tamaño, es muy sencillo, ofrece una radiación omnidireccional, por ello la distancia de transmisión va a ser la misma en todas las direcciones siempre y cuando la antena se encuentra lo mas recta posible y perpendicular al módulo XBee. Este tipo de antena presenta una ganancia de 0 a 2 dBi.

b) Antena en chip

Esta antena es un chip de cerámica plano que se adecua a la estructura del módulo, es pequeño y resistente. Posee un patrón de radiación cardiode, lo que significa que la señal está atenuada en muchas direcciones. Los lugares ideales para este tipo de antenas son aquellos en los que el dispositivo se somete a un estrés mecánico y pueda romperse cualquier otro tipo de antena o bien por cuestiones de espacio.

c) Antena PCB

Este tipo de antena se encuentra impresa directamente sobre la placa del circuito XBee, generalmente viene solo en los modelos XBee-PRO S2, ofrece características similares a la antena chip con un menor costo.

d) Conector U.FL

Este tipo de antena es el modelo más pequeño de conectores de antena externa. Se utiliza generalmente en aquellos casos en los que la placa debe estar dentro de una caja de recubrimiento metálica o en el caso de necesitar un tipo de antenas con un patrón específico de radiación.

e) Conector RPSMA

Este tipo de antena viene a ser un tipo de socket del conector U.FL, este socket es de mayor dimensión pero nos ofrece la ventaja que podemos utilizar una antena externa sobre el módulo XBee sin necesidad de cable adicional de este modo podremos tener mayor potencia utilizando el módulo XBee.

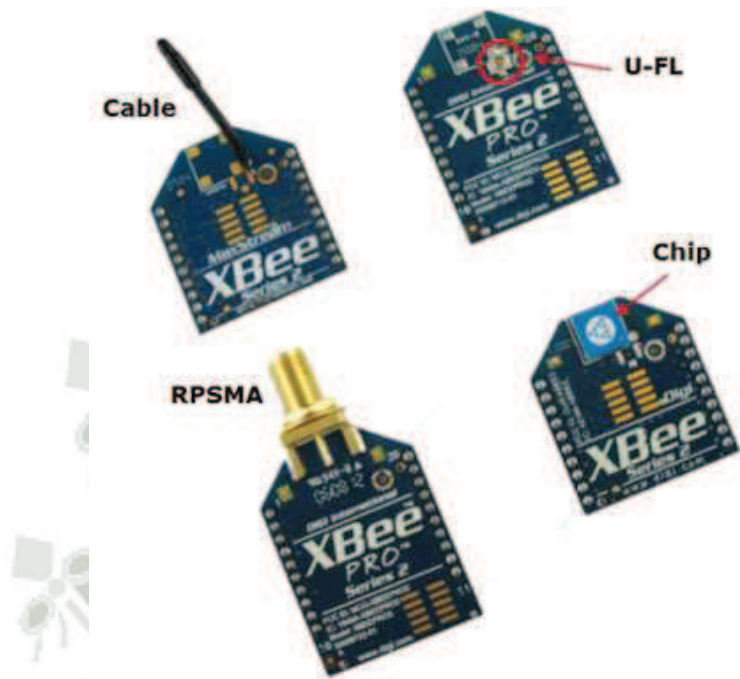


Figura 2.17: Módulos XBee

2.3.5.3 Antenas en Módulos XBee Series 2

Se va a desechar el uso de antenas del tipo PRO ya que a pesar de que estas proporcionan un mayor rango de acción (1600m), el consumo incrementa de manera significativa (295mA a 3.3V) en comparación con los módulos normales, lo que le proporciona una gran desventaja a la hora de proporcionar un sistema autónomo y es contrario a lo que se busca para alarga la vida útil de la batería. Así mismo, en una red de este tamaño (5.00 m x 2.20 m) un dispositivo con un alcance tan grande como el de la serie PRO sería desproporcionado.

| Dispositivo XBee | Rango | Consumo Potencia | Frecuencia | protocolo | Potencia TX | Datos | Antena |
|-------------------------------------|-------|------------------|------------|-------------|-------------|----------|---------------|
| XBee 2mW PCB -S2 | 120 m | 40 mA @ 3.3 V | 2.4 GHz | ZigBee Mesh | 2 mW | 250 kbps | PCB |
| XBee 2mW RPSMA - S2 | 120 m | 40 mA @ 3.3 V | 2.4 GHz | ZigBee Mesh | 2 mW | 250 kbps | Externa RPSMA |
| XBee 2mW U.FL Connection -S2 | 120 m | 40 mA @ 3.3 V | 2.4 GHz | ZigBee Mesh | 2 mW | 250 kbps | Externa |
| XBee 2mW Wire Antenna-S2 | 120 m | 40 mA @ 3.3 V | 2.4 GHz | ZigBee Mesh | 2 mW | 250 kbps | Cable |

Tabla 2.6: Dispositivos Xbee Serie 2

Como se puede apreciar en la tabla 2.6 las características de los dispositivos Xbee Serie 2 son similares. Por ello según la naturaleza del proyecto y las necesidades que vienen dadas por el entorno en el que se realizará el despliegue, se escogerá Xbee Serie 2 Wire Antena, por el costo y disponibilidad en el mercado.

Al proteger la placa con una caja protectora para evitar la manipulación o el deterioro causado por los elementos externos se tendrá que adecuar para usar tipo Wire Antena, ya que de lo contrario la atenuación y la pérdida de señal evitarán el funcionamiento óptimo de la solución.

2.3.6 Operación Módulo XBee UART

El microcontrolador interno del módulo se comunica con el exterior mediante una UART (Transmisor-Receptor Asíncrono Universal). Como se puede apreciar en la figura 2.18, una primera forma de utilizar estos módulos es haciendo que el microcontrolador externo se comuniquen con el módulo XBee a través de su puerto serie. El módulo XBee funciona a 3.3V y si en el caso que el microcontrolador externo funcionara a 5V habrá que realizar una adaptación de niveles.

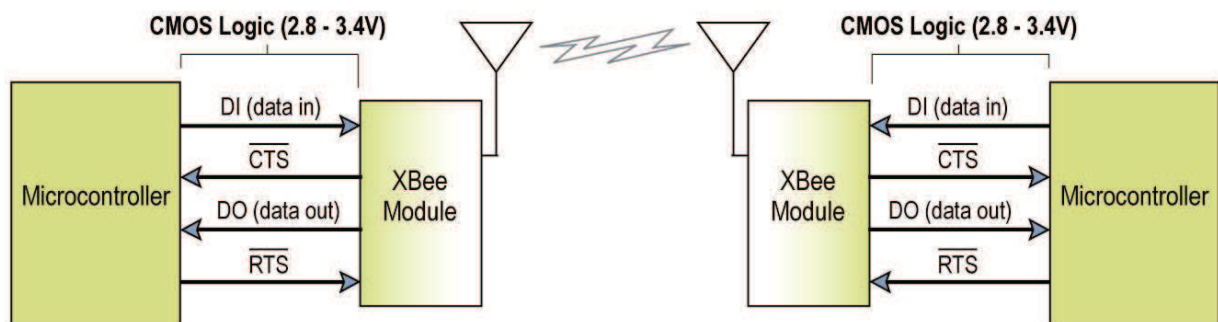


Figura 2.18: Comunicación UART entre módulos XBee

2.3.6.1 Datos Seriales

Los datos entran en el módulo UART a través del pin DI (pin 3) como señales seriales asíncronas. Cuando no se transmiten datos la señal queda como *high* como se puede apreciar en la figura 2.19.

Cada byte de datos consiste de un bit de comienzo (nivel low), 8 bits de datos con el bit menos significativo al inicio y un bit de stop (nivel high).

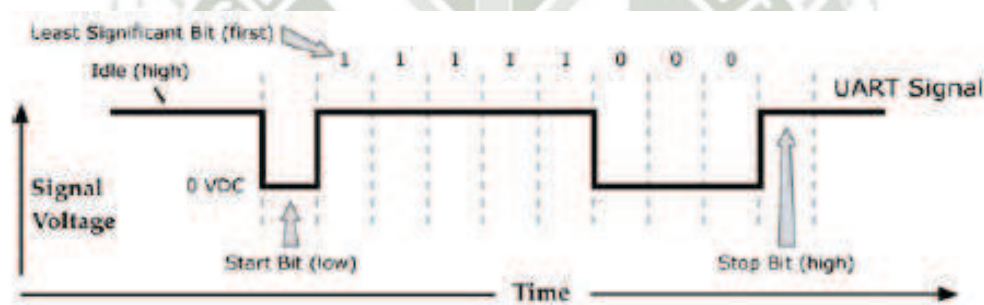


Figura 2.19: Transmisión señal UART en XBee

2.3.6.2 Envío de paquete UART a través de módulo XBee

El módulo XBee realiza tareas como el timing y la comprobación de paridad, las mismas que se necesitan para la comunicación de datos. Las comunicaciones UART dependen necesariamente de que las dos unidades XBee estén

previamente configuradas con parámetros compatibles como baudios, paridad, etc.

2.3.6.3 Operación Transparente

Los módulos XBee/XBee-PRO vienen programados de fabrica para trabajar en modo transparente, lo que quiere decir que los módulos actúan como reemplazo de las líneas seriales (al recibir datos RF se envían por el pin DO).

2.3.6.3.1 Empaquetado Serial a RF

Todos los datos se acumulan en el buffer de DI hasta que alguna de las siguientes condiciones harán que los datos sean empaquetados y posteriormente transmitidos:

- Cuando no se reciben caracteres durante el tiempo determinado por el RO (Packetization Timeout). Si el RO = 0, la transmisión comenzará cuando se reciba un carácter.
- En el caso se reciba el máximo número de caracteres que soporta un paquete RF (100 bytes).
- Si se recibe la secuencia del modo de comando (GT + CC + GT), cualquier carácter almacenado en el buffer DI antes de la secuencia es transmitido. Si el

buffer de DI se satura, se deberá implementar un control de flujo de software o hardware para prevenir pérdida de paquetes entre el host y el módulo.

2.3.6.3.2 Formato entrada/salida (I/O)

Todos los datos de entrada/salida siempre se inician con una cabecera. El primer byte de la cabecera va a definir el número de muestras que llegarán. Los dos últimos bytes de la cabecera (Channel Indicator) van a definir que entradas estarán activas. Cada bit representa tanto una línea DIO(entrada/salida) como un canal ADC.

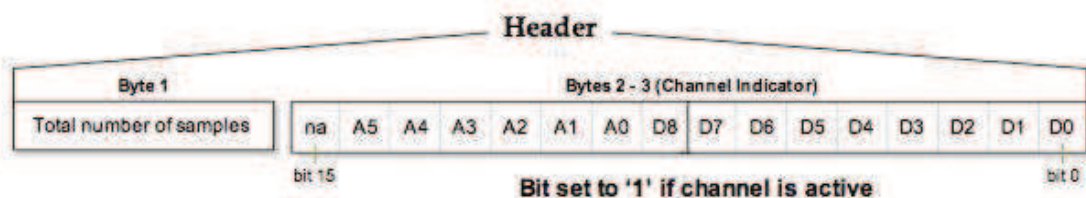


Figura 2.20: Formato de entrada/salida

El frame del indicador de canal (Channel Indicator) se usa para determinar cómo leer esta muestra. En el caso de que cualquiera de las líneas DIO están habilitadas, los dos primeros bytes serán los datos DIO seguidos de los datos ADC.

2.3.6.4 Direccionamiento de Red

Todos los paquetes RF que se envían utilizando el aire como medio de transmisión contienen su dirección origen y su dirección de destino en la cabecera. Los módulos XBee se rigen a las especificaciones 802.15.4 y soportan direccionamientos cortos de 16 bits y largos de 64 bits. Una dirección única de origen de 64 bits IEEE se asigna de fábrica y esta puede ser leída con los comandos SL (Serial Number Low) y SH (Serial Number High). Los direccionamientos cortos se asignarán manualmente.

- a) Si deseamos enviar un paquete a un módulo específico usando el direccionamiento de 64 bits lo que tiene que realizar es configurar la dirección de destino (DL+DH) para que se ajuste a la dirección de origen (SL+SH) del módulo de destino.
- b) Si deseamos enviar un paquete a un módulo específico usando el direccionamiento de 16 bits lo que se tiene que realizar es configurar el parámetro DL (Destination Address Low) igual que el parámetro MY (Source Address) y el parámetro DH (Destination Address High) con el valor de 0.

2.3.6.4.1 Modo Unicast

Los módulos XBee funcionan en modo Unicast esto por configuración de fábrica, en este modo se soportan reintentos. Los módulos receptores envían ACK

(acknowledgment) de los paquetes al transmisor, si este módulo transmisor no recibe el ACK volverá a transmitir el paquete hasta un número de tres veces o hasta que el ACK sea recibido.

2.3.6.4.1.1 Dirección de 16 bits

El módulo XBee se puede configurar para usar direccionamientos de 16 bits como dirección de origen configurando el parámetro MY < 0xFFFFE. Cambiando el parámetro DH = 0 se modificará la dirección de destino para que se use direccionamiento corto de 16 bits, si DL < 0xFFFFE. En la comunicación entre módulos con direcciones de 16 bits el parámetro MY debe ser el mismo.

| Parámetros | Modulo XBee 1 | Modulo XBee 2 |
|-----------------------------|---------------|---------------|
| MY (Dirección origen) | 0x01 | 0x02 |
| DH (Dirección destino Alta) | 0 | 0 |
| DL (Dirección destino Baja) | 0x02 | 0x01 |

Tabla 2.7: Parámetros MY, DH, y DL

2.3.6.4.1.2 Dirección de 64 bits

Los números de serie de los módulos XBee (SL y SH) pueden ser usados como dirección de origen de 64 bits cuando el parámetro MY (dirección origen de 16 bits) está deshabilitado.

Cuando el nodo final se une a un nodo coordinador, su parámetro MY se cambia a 0xFFFE para habilitar el direccionamiento de 64 bits. La dirección de 64 bits del módulo se almacena como parámetros SH y SL, para lograr enviar un paquete a un módulo específico, la dirección de destino (DL+ DH) deberá coincidir con la dirección de origen (SL + SH) del otro módulo.

2.3.6.4.2 Modo Broadcast

Cualquier módulo XBee dentro del rango aceptará un paquete que contenga una dirección de broadcast. En este modo, los módulos receptores no envían ACKs (acknowledgments) al igual que los transmisores no reenvían paquetes como el caso de modo Unicast.

2.3.6.4.3 Payload Máximo

El Payload máximo viene a ser el área de datos máximo (payload en inglés) que contiene los datos que se desean transmitir.

| | Unicast | Broadcast |
|---------------|----------|-----------|
| Encriptado | 66 Bytes | 84 Bytes |
| Sin Encriptar | 74 Bytes | 92 Bytes |

Tabla 2.8: Payload máximo

2.3.6.5 Modos de Operación

Dentro de los modos de operación que soportan los módulos XBee tenemos:



Figura 2.21: Modos Operación ZigBee

2.3.6.5.1 Modo Idle

Cuando no se reciben ni transmiten datos, el módulo RF se encuentra en estado Idle (inactivo). El módulo cambia de estado, bajo las siguientes condiciones:

- Modo Transmisión (se reciben datos del Serial en el buffer DI)
- Modo Recepción (se reciben datos RF a través de la antena)
- Modo Sleep (cuando se da la condición de Sleep)
- Modo Comando (se activa la secuencia del modo de comando)

2.3.6.5.2 Modos Transmisión/Recepción

Se definen dos métodos de transmisión de datos:

a) Transmisión directa

Los datos van ser transmitidos a la dirección de destino. Se puede configurar un Coordinador sin beacons para usar solo transmisión directa dando al parámetro SP (Cyclic Sleep Period) un valor de 0. Un coordinador sin beacons usando transmisión indirecta cambiará a transmisión directa si sabe que el módulo de destino está disponible y despierto.

Para habilitar este comportamiento, el valor ST (Time Before Sleep) del coordinador debe coincidir con el valor ST del nodo final. Una vez que el nodo final transmita datos al coordinador o pregunte al coordinador por datos, el Coordinador utilizará la transmisión directa para todos los datos siguientes hasta que el parámetro ST se quede sin actividad.

b) Transmisión indirecta

El paquete se guarda durante un lapso de tiempo y solo se transmite tras el requerimiento del módulo de destino. Para configurar la transmisión indirecta en una Red de Área Personal, el valor del parámetro SP (Cyclic Sleep Period) en el Coordinador debe coincidir con el mayor valor de sleep de cualquiera de los Nodos finales.

c) CCA (Clear Channel Assessment)

Antes de transmitir un mensaje se debe enviar un CCA en el canal para verificar si se encuentra disponible para la transmisión. La energía detectada en el canal se compara con el valor del parámetro CA, si esta energía excede el valor del parámetro no se producirá la transmisión del paquete.

Además, se incluye un retraso antes de que la transmisión tenga lugar, este retraso se configura a través del parámetro RN (Backoff Exponent). Si este

parámetro se pone a '0' no habrá retraso antes del primer CCA. El parámetro RN es comparable al parámetro "minBE" en la especificación 802.15.4.

Por defecto, el parámetro MM (MAC Mode) es igual a 0. Ante un fallo de CCA el módulo intentará reenviarlo hasta en dos ocasiones más. En modo Unicast con RR (reintentos) igual a 0 el módulo ejecutará dos intentos de CCA.

2.3.6.5.3 Modo Sleep

El modo sleep prepara al módulo XBee para entrar en un estado de bajo consumo. Para acceder a este modo se requiere que alguna de las siguientes condiciones se lleven a cabo (el módulo XBee debe tener un parámetro SM distinto de 0):

- Sleep - RQ (pin 9) tiene que ser forzado.
- El módulo se encuentra en estado inactivo (idle) durante el periodo de tiempo determinado por el parámetro ST (Time before Sleep). ST solo estará activo cuando SM sea igual a 4-5.

| Sleep Mode Setting | Transition into Sleep Mode | Transition out of Sleep Mode (wake) | Characteristics | Related Commands | Power Consumption |
|----------------------------------|---|---|---|------------------|-----------------------|
| Pin Hibernate (SM = 1) | Assert (high) Sleep_RQ (pin9) | De-assert (low) Sleep_RQ | Pin/Host-controlled/NonBeacon systems only/Lowest Power | (SM) | < 10 u A (@ 3.0 VCC) |
| Pin Doze (SM = 2) | Assert (high) Sleep_RQ (pin9) | De-assert (low) Sleep_RQ | Pin/Host-controlled/NonBeacon systems only/Fastest wake-up | (SM) | < 50 uA |
| Cyclic Sleep (SM = 4 – 5) | Automatic transition to Sleep Mode as defined by the SM (Sleep Mode) and ST(Time before Sleep) parameters | Transition occurs after the cyclic sleep time interval elapses. The time interval is defined by the SP (Cyclic Sleep Period) parameter. | RF module wakes in pre-determined time intervals to detect if RF data is present/ when SM = 5, NonBeacon systems only | (SM), SP, ST | < 50 uA when sleeping |

Tabla 2.9: Especificaciones modo Sleep

El modo Sleep se deberá usar obligatoriamente en los nodos finales y no podrá ser usado en nodos Coordinadores, en los nodos Routers existe la posibilidad de que entren en este estado.

El modo sleep reacciona rápidamente a la variación de voltaje, cuando se genera un voltaje superior a 3.0V se produce un incremento de consumo considerable.

| Vcc (V) | XBee | | | XBee-PRO | | |
|---------|--------|--------|--------|----------|--------|--------|
| | SM=1 | SM=2 | SM=4.5 | SM=1 | SM=2 | SM=4.5 |
| 2.8-3.0 | <3 uA | <35 uA | <34 uA | <4 uA | <34 uA | <34 uA |
| 3.1 | 8 uA | 37 mA | 36 uA | 12 uA | 39 uA | 37 uA |
| 3.2 | 32 uA | 48 uA | 49 uA | 45 uA | 60 uA | 55 uA |
| 3.3 | 101 uA | 83 uA | 100 uA | 130 uA | 115 uA | 120 uA |
| 3.4 | 255 uA | 170 uA | 240 uA | 310 uA | 260 uA | 290 uA |

Tabla 2.10: Variación de voltaje y consumo en modo Sleep

2.3.7 Certificaciones Europeas (ETSI) y requerimientos para módulos XBee y Antenas

2.3.7.1 Restricciones-Potencia de salida

La potencia de salida en módulos XBee-PRO no excederá de 10dBm. El nivel de potencia se establece mediante el parámetro PL y este debe ser igual a 0 (10dBm).

2.3.7.2 Antenas aprobadas

En el uso de antenas de alta ganancia las regulaciones Europeas estipulan unos máximos de potencia EIRP.

a) Antena Tipo Yagui

Los módulos XBee han sido probados con antenas de hasta 15dBi de ganancia con 1dB de pérdida en cable. Podremos utilizar cualquier antena Yagui con 14 dBi de ganancia o menos sin pérdida de línea.

b) Antena Tipo Omnidireccional

Los módulos XBee han sido probados con antenas de hasta 15 dBi de ganancia con 1 dB de pérdida en cable. Podremos utilizar cualquier antena Omnidireccional con 15 dBi de ganancia o menos sin tener pérdida de línea.

2.4 ANÁLISIS DEL PROTOTIPO DE TERRENO AGRICOLA**2.4.1 Ubicación del área del proyecto**

El entorno de estudio se encuentra ubicado en una pequeña huerta, esto como un prototipo de un terreno de cultivo, tiene un area de (5.00 m x 2.20 m), está dedicada al cultivo agrario (Palta Hass, Manzana, Lucma, Veterraga y lechuga) tal y como se puede apreciar en la figura 2.22, el terreno (prototipo) se encuentra libre de posibles obstáculos que pudieran producir atenuación en la transmisión o recepción de datos.



Figura 2.22: Prototipo de despliegue de proyecto

2.5 PLATAFORMA DE HARDWARE LIBRE ARDUINO

2.5.1 Introducción

Arduino es una herramienta para hacer que los ordenadores puedan sentir y controlar el mundo físico a través de tu ordenador personal. Es una plataforma de desarrollo de computación física (physical computing) de código abierto.

Basada en una placa con un sencillo microcontrolador y un entorno de desarrollo para crear software (programas) para la placa.

Se puede usar Arduino para crear objetos interactivos, leyendo datos de una gran variedad de interruptores y sensores y controlar multitud de tipos de luces, motores y otros actuadores físicos. Los proyectos de Arduino pueden ser autónomos o comunicarse con un programa (software) que se ejecute en tu ordenador (ej. Flash, Processing, MaxMSP). La placa puedes montarla tu mismo o comprarla ya lista para usar, y el software de desarrollo es abierto y lo puedes descargar gratis.

El lenguaje de programación de Arduino es una implementación de Wiring, una plataforma de computación física parecida, que a su vez se basa en Processing, un entorno de programación multimedia.

2.5.2 Justificación y ventajas del uso de ARDUINO

Hay muchos otros microcontroladores y plataformas con microcontroladores disponibles para la computación física, Parallax Basic Stamp, BX-24 de Netmedia, Phidgets, Handyboard del MIT, y muchos otros ofrecen funcionalidades similares. Todas estas herramientas organizan el complicado trabajo de programar un microcontrolador en paquetes fáciles de usar. Arduino, además de simplificar el

proceso de trabajar con microcontroladores, ofrece algunas ventajas respecto a otros sistemas a profesores, estudiantes y amateurs.

- **Asequible:** Las placas Arduino son más asequibles comparadas con otras plataformas de microcontroladores. La versión más cara de un modulo de Arduino puede ser montada a mano, e incluso ya montada cuesta bastante menos de 60€.
- **Multi-Plataforma:** El software de Arduino funciona en los sistemas operativos Windows, Macintosh OSX y Linux. La mayoría de los entornos para microcontroladores están limitados a Windows.
- **Entorno de programación simple y directa:** El entorno de programación de Arduino es fácil de usar para principiantes y lo suficientemente flexible para los usuarios avanzados. Pensando en los profesores, Arduino está basado en el entorno de programación de Processing con lo que el estudiante que aprenda a programar en este entorno se sentirá familiarizado con el entorno de desarrollo Arduino.
- **Software ampliable y de código abierto:** El software Arduino esta publicado bajo una licencia libre y preparado para ser ampliado por programadores experimentados. El lenguaje puede ampliarse a través de librerías de C++, y si se está interesado en profundizar en los detalles técnicos, se puede dar el salto

a la programación en el lenguaje AVR C en el que está basado. De igual modo se puede añadir directamente código en AVR C en tus programas si así lo deseas.

- **Hardware ampliable y de Código abierto:** Arduino está basado en los microcontroladores ATMEGA168, ATMEGA328 y ATMEGA1280. Los planos de los módulos están publicados bajo licencia Creative Commons, por lo que diseñadores de circuitos con experiencia pueden hacer su propia versión del módulo, ampliándolo u optimizándolo. Incluso usuarios relativamente inexpertos pueden construir la versión para placa de desarrollo para entender cómo funciona y ahorrar algo de dinero.

2.5.3 Definición

Es una herramienta que permite sensar y controlar más elementos del mundo físico que tu computadora de escritorio o laptop. Es una plataforma que consta de dos partes: una tarjeta de microcontrolador (parte física o hardware) y un entorno de desarrollo (también llamado "IDE" que es el software para realizar la programación del Arduino). Esto es importante de entender ya que no hay solo una tarjeta Arduino sino que hay diferentes tarjetas oficiales que podemos utilizar con el IDE que es de código abierto y se puede descargar gratis.

Con Arduino al igual que con otras tarjetas de microcontroladores, se puede leer variedades de entradas (switches, botones, sensores, etc.) y controlar salidas (luces, motores, etc.). Pero a diferencia de las otras tarjetas, utiliza lo que se llama un "bootloader", éste es un programa que ya viene instalado en el microcontrolador y que en este caso se encarga de grabar al microcontrolador el

programa que hemos escrito en el IDE de Arduino. Esto es una gran ventaja ya que permite ahorrarse el tener que usar un grabador (una tarjeta aparte necesaria para grabar en un microcontrolador). También permite conectarse con programas en la PC como Flash, Processing o MaxMSP.

El lenguaje de programación de Arduino es una implementación de "Wiring", una plataforma computacional física similar, que está basada en el entorno de programación multimedia "Processing".

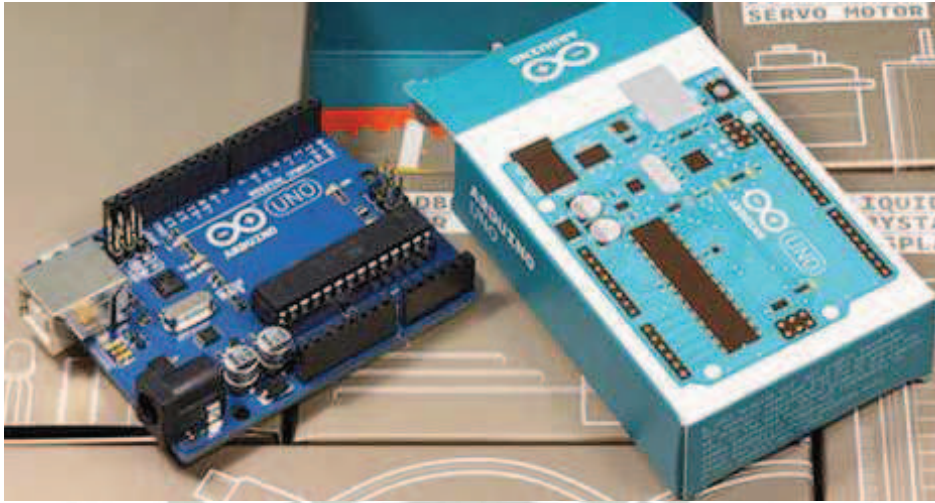


Figura 2.23: Entorno físico de una tarjeta Arduino

2.5.4 Shield de Arduino

Un Shield viene a ser una tarjeta de expansión que se monta encima del Arduino. Permite añadirle funcionalidades como conexión ethernet (red cableada)

o wi-fi (red inalámbrica) que le pueden dar acceso a internet, comunicación de radiofrecuencia, entre otros.

2.5.5 Aplicaciones

Como permite tanto hacer aplicaciones independientes como aplicaciones que se comuniquen con una computadora, a través de internet, o

inalámbricamente, el límite es la imaginación. Las grandes ventajas de Arduino son la facilidad de uso en comparación con otras plataformas que requieren mayor nivel de conocimiento electrónico y su gran adopción a nivel mundial.

El módulo Arduino ha sido usado como base en diversas aplicaciones electrónicas:

- Xoscillo: Osciloscopio de código abierto.
- Equipo científico para investigaciones.
- Arduinome: Un dispositivo controlador MIDI.
- OBDuino: un económetro que usa una interfaz de diagnóstico a bordo que se halla en los automóviles modernos.
- Humane Reader: dispositivo electrónico de bajo coste con salida de señal de TV que puede manejar una biblioteca de 5000 títulos en una tarjeta microSD.
- The Humane PC: equipo que usa un módulo Arduino para emular un computador personal, con un monitor de televisión y un teclado para computadora.
- Ardupilot: software y hardware de aeronaves no tripuladas.
- ArduinoPhone: un teléfono móvil construido sobre un módulo Arduino.

2.5.6 Requerimientos básicos para utilizar ARDUINO

Lo mínimo que se necesita es una tarjeta de Arduino como la "Arduino UNO", un cable USB, descargar el IDE de Arduino y una computadora para poder programarlo. Existen variedad de tutoriales en la página principal de ARDUINO para hacer diversos proyectos con los que nos abrirán las puertas a muchas aplicaciones que no sabíamos que se podían hacer tan fácilmente.

2.6 ENERGÍA RENOVABLE-PANEL FOTOVOLTAICO

2.6.1 Definición

De entre las distintas fuentes de energía, las renovables son aquellas que se producen de forma continua y son inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen, o porque son capaces de regenerarse por medios naturales.

El sol está en el origen de todas las energías renovables porque su calor provoca en la Tierra las diferencias de presión que dan origen a los vientos, fuente de la energía eólica, el sol ordena el ciclo del agua, causa la evaporación que predispone la formación de nubes y, por tanto, las lluvias. También del sol procede la energía hidráulica. Las plantas se sirven del sol para realizar la fotosíntesis, vivir

y crecer. Toda esa materia vegetal es la biomasa. El sol se aprovecha directamente en las energías solares, tanto la térmica como la fotovoltaica.

Utilizar la radiación solar para producir calor o electricidad no disminuye la cantidad de energía que el Sol envía a la Tierra. Sí podría hacerlo el uso indiscriminado de biomasa natural. Un aprovechamiento excesivo de la misma, en forma de leña, por ejemplo, provocaría una rápida degradación de los ecosistemas naturales. Aún así, sigue siendo la base del consumo energético de los países en vías de desarrollo que, en muchos casos, explotan las masas vegetales por encima de sus posibilidades productivas, lo que provoca problemas de erosión y desertización.

2.6.2 Características

- Las energías renovables son, además, fuentes de energía amigables con el medio ambiente. La generación y el consumo de las energías convencionales causan importantes efectos negativos en el entorno.
- Las energías renovables no producen emisiones de CO₂ y otros gases contaminantes a la atmósfera,
- Asimismo las energías renovables son fuentes autónomas, por lo que disminuyen la dependencia de la importación de combustibles.

2.6.3 Tipos

Entre las fuentes renovables de energía podemos considerar:

- Energía solar: Fotovoltaica y Térmica
- Energía eólica
- Energía hidráulica
- Energía de la biomasa (Bioenergía)
- Energía geotérmica

En el Perú existe un gran potencial para el aprovechamiento de las energías renovables.

2.6.4 Energía Solar Fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es un tipo de electricidad renovable obtenida directamente a partir de la radiación solar mediante un dispositivo semiconductor denominado célula fotovoltaica, o una deposición de metales sobre un sustrato llamado célula solar de película fina.

Este tipo de energía se usa para alimentar innumerables aparatos autónomos, para abastecer refugios o casas aisladas de la red eléctrica y para

producir electricidad a gran escala a través de redes de distribución. Debido a la creciente demanda de energías renovables, la fabricación de células solares e instalaciones fotovoltaicas ha avanzado considerablemente en los últimos años.

Entre los años 2001 y 2012 se ha producido un crecimiento exponencial de la producción de energía fotovoltaica, doblándose aproximadamente cada dos años. Si esta tendencia continúa, la energía fotovoltaica cubriría el 10% del consumo energético mundial en 2018, alcanzando una producción aproximada de 2200 TWh, y podría llegar a proporcionar el 100% de las necesidades energéticas actuales en torno al año 2027.

Gracias a los avances tecnológicos, la sofisticación y la economía de escala, el costo de la energía solar fotovoltaica se ha reducido de forma constante desde que se fabricaron las primeras células solares comerciales, aumentando a su vez la eficiencia, y logrando que su coste medio de generación eléctrica sea ya competitivo con las fuentes de energía convencionales en un creciente número de regiones geográficas, alcanzando la paridad de red. Programas de incentivos económicos, primero, y posteriormente sistemas de autoconsumo fotovoltaico y balance neto sin subsidios, han apoyado la instalación de la fotovoltaica en un gran número de países, contribuyendo a evitar la emisión de una mayor cantidad de gases de efecto invernadero.

La tasa de retorno energético de esta tecnología, por su parte, es cada vez menor. Con la tecnología actual, los paneles fotovoltaicos recuperan la energía

necesaria para su fabricación en un período comprendido entre 6 meses y 1,4 años; teniendo en cuenta que su vida útil media es superior a 30 años, producen electricidad limpia durante más del 95% de su ciclo de vida.

2.6.4.1 Panel Fotovoltaico

Los paneles o módulos fotovoltaicos están formados por un conjunto de celdas que producen electricidad a partir de la luz que incide sobre ellos. El parámetro estandarizado para clasificar su potencia se denomina potencia pico, y se corresponde con la potencia máxima que el módulo puede entregar bajo condiciones estandarizadas como Radiación de 1000 W/m^2 y Temperatura de célula de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (no temperatura ambiente).

Se puede producir paneles fotovoltaicos de muchos elementos. Con mejorados y nuevos métodos de producción y el uso de nuevos elementos incluyendo materiales orgánicos, existe hoy una gran variedad de productos.

El costo de los paneles fotovoltaicos se ha reducido de forma constante desde que se fabricaron las primeras células solares comerciales y su costo medio de generación eléctrica ya es competitivo con las fuentes de energía convencionales en un creciente número de regiones geográficas, alcanzando la paridad de red.

2.6.4.2 Sistemas Fotovoltaicos

Se define un sistema fotovoltaico como el conjunto de elementos conexiónados entre sí capaces de suministrar energía eléctrica, a partir de la transformación directa de la energía solar.

2.6.4.2.1 Elementos de un Sistema Fotovoltaico

El elemento esencial de todo sistema fotovoltaico son los módulos fotovoltaicos, que transforma la energía solar en energía eléctrica a partir del efecto fotovoltaico.

Al conjunto de módulos fotovoltaicos conectados entre sí con el fin de conseguir la potencia requerida, se le denomina generador fotovoltaico. La asociación de paneles en serie, en paralelo o de forma mixta, permite obtener diferentes valores de intensidad y tensión a la salida del generador fotovoltaico.

Los demás componentes de un sistema, están situados entre el generador y el usuario final de la energía producida y su composición y situación dentro del sistema depende del tipo de instalación que consideremos. En general, son elementos típicos de una instalación o sistema fotovoltaico el generador y los convertidores. Además, en sistemas fotovoltaicos autónomos forman parte de cualquier instalación los acumuladores y los reguladores o sistemas de control.

Se denominan convertidores a dos tipos de equipos electrónicos: los convertidores corriente continua - corriente continua (CC/CC) y los convertidores corriente continua - corriente alterna (CC/CA). Los primeros se utilizan para elevar o bajar la tensión de trabajo, se utilizan en instalaciones fotovoltaicas autónomas y normalmente están situados entre la batería y el consumo o a la entrada de un convertidor CC /CA. Este tipo de convertidores no es de uso frecuente, debido a que en la mayoría de las instalaciones se puede realizar un diseño de forma que no sea necesario su uso. Los convertidores CC/CA, también llamados inversores, transforman la corriente continua con la que funciona una instalación fotovoltaica, en corriente alterna. El convertidor está situado en la línea de consumo y su participación es imprescindible para poder suministrar corriente alterna.

2.6.4.2.2 Tipos de sistemas fotovoltaicos

De acuerdo a la aplicación requerida podemos clasificar a los sistemas fotovoltaicos de la siguiente manera:

a) Sistemas fotovoltaicos autónomos

Se caracterizan por estar diseñados para cubrir el total de la demanda energética. Debido a la naturaleza variable de la fuente energética, el sol, se introduce el concepto de fiabilidad del sistema y se habla de que el sistema cubre la demanda con una cierta fiabilidad.

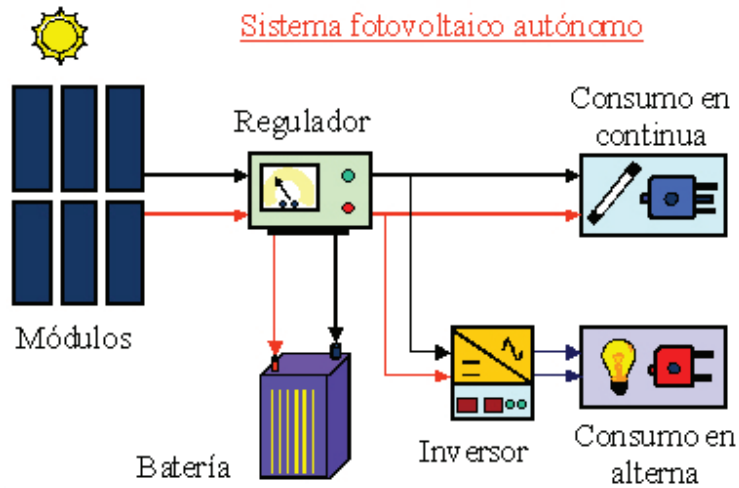


Figura 2.24: Esquema típico de un sistema fotovoltaico autónomo

Exceptuando los sistemas de bombeo, todos los sistemas fotovoltaicos autónomos tienen un sistema de acumulación, normalmente baterías estacionarias de plomo - ácido. La rentabilidad de los sistemas fotovoltaicos autónomos, viene condicionada por su competitividad frente a otras opciones, red eléctrica y grupos electrógenos, principalmente. Podemos decir que en las aplicaciones actuales se cumplen las características siguientes: necesidades energéticas bajas y lugares alejados de la red. Entre estas aplicaciones hay que destacar, por el número de instalaciones realizadas, los sistemas de electrificación rural de zonas aisladas y los sistemas para telecomunicaciones.

b) Sistemas fotovoltaicos híbridos

Se caracterizan porque incluyen además de los paneles fotovoltaicos, una o varias fuentes auxiliares de potencia, como puede ser un generador auxiliar, gasolina o diesel, o un generador eólico. Normalmente, estos sistemas incluyen baterías de menor tamaño que las de los sistemas autónomos. Su fiabilidad, al no depender de una sola fuente energética, suele ser mayor.



Figura 2.25: Esquema típico de un sistema mixto fotovoltaico-diesel.

Como único inconveniente cabe señalar la mayor complejidad en el sistema de regulación y control de los mismos.

c) Sistemas fotovoltaicos conectados a red

Estos sistemas no incluyen baterías. La conexión entre los paneles fotovoltaicos y la red se realiza a través de un inversor. Este inversor debe ser capaz de aceptar las variaciones de voltaje y potencia propias de los paneles, trabajar en el punto de máxima potencia del generador fotovoltaico y enviar a la red energía con una calidad aceptable. Dependiendo del voltaje de la red en el punto de conexión y en concreto para tensiones mayores de 220 o 380 V, será necesario utilizar transformadores con las protecciones adecuadas. Estos sistemas han conocido un avance espectacular, tanto en su tamaño como en el número de instalaciones realizadas.

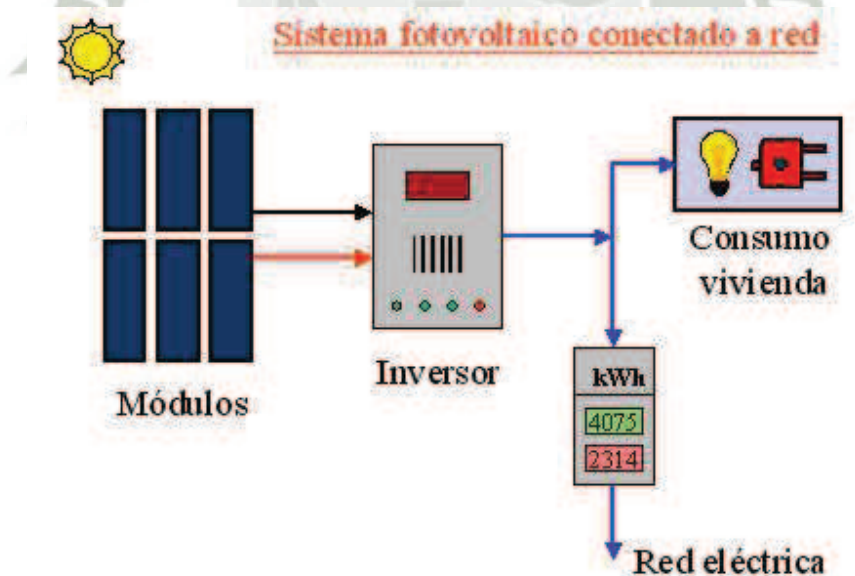


Figura 2.26: Esquema de una instalación fotovoltaica conectada a la red

2.6.4.2.3 Aplicaciones

Es difícil realizar una descripción exhaustiva de las aplicaciones de la energía solar fotovoltaica, debido a que, como sistema energético, es posible su utilización, en principio, para cualquier fin. Las limitaciones en cuanto a su aplicación no vienen determinadas por el estado de la tecnología, sino que vienen condicionada por su rentabilidad frente a otras fuentes de energía convencionales. Se puede realizar una clasificación en función de los campos de aplicación:

- Electrificación rural: Viviendas aisladas, viviendas de fin de semana o de ocupación temporal, refugios de montaña.
- Telecomunicaciones: Repetidores y Reemisores de radio y televisión, Radioteléfonos, Telemetría.
- Señalización y protecciones para: Navegación aérea, Radiofaros y radiobalizas, autopistas, teléfonos de urgencia en autopistas, ferrocarriles, equipos de radio en puestos de vigilancia forestal, Estaciones meteorológicas.
- Protección catódica: Puentes, Gasoductos, Oleoductos.
- Iluminación: Iluminación de vallas publicitarias, Iluminación pública.
- Aplicaciones agrícolas: Bombeo de agua, Riego por goteo, Riegos a baja presión, Iluminación y control de invernaderos, Telecontrol de redes de riego.
- Aplicaciones ganaderas: Iluminación de granjas y establos, Sistemas de ordeño, Sistemas de refrigeración de la leche, Electrificación de cercas.

- Aplicaciones militares: Generadores autónomos, Equipos de campaña, Radioteléfonos, Cargadores de batería.
- Desalinización: Depuración de agua del mar, Depuración de agua salobre.
- Aplicaciones de recreo: Yates y veleros, Equipamiento de áreas recreativas, Camping y caravana, Aerodelismo, entre otras.



CAPÍTULO III



DISEÑO DE LA RED INALÁMBRICA DE SENSORES

3.1 SISTEMA DE COMUNICACIÓN

El Sistema de Comunicación hace referencia al protocolo que maneja la transferencia de datos entre los dispositivos de la red, en nuestro caso se usa el protocolo ZigBee. Es por ello que se va a describir el diseño y la configuración de una red inalámbrica en base al módulo de transmisión inalámbrica XBee S2 y el Hardware Arduino UNO.

Considerando la información presentada a lo largo del capítulo anterior, se realiza la elección de la comunicación inalámbrica para el diseño de la red inalámbrica de sensores.

Realizando un análisis a los sistemas inalámbricos que no requieren de cableado, se determina que estos poseen sistemas distribuidos potentes, complejos y costosos, los cuales no se ajustan a los requerimientos de la red inalámbrica de sensores. Es por ello que se requieren dispositivos sencillos, económicos, y con un consumo bajo de energía.

Para elegir el tipo de tecnología inalámbrica que se adapta a nuestras necesidades nos hemos fijado en unos parámetros específicos de cada estándar como son: cobertura, consumo, precio, frecuencia de trabajo y el protocolo de comunicación.

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 inalámbricas de sensores que permiten cubrir estos requerimientos, las cuales son una aplicación importante para las tecnologías inalámbricas de corto alcance ideales en este tipo de comunicación.

Es así que surge ZigBee, que cuenta con la base de IEEE 802.15.4 el cual posee compatibilidad con otros productos o microcontroladores de bajo consumo por ejemplo ATMEL y PIC.

ZigBee se ha desarrollado considerablemente 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 dificultad sin necesidad de hacer grandes cambios a la red instalada y operativa.

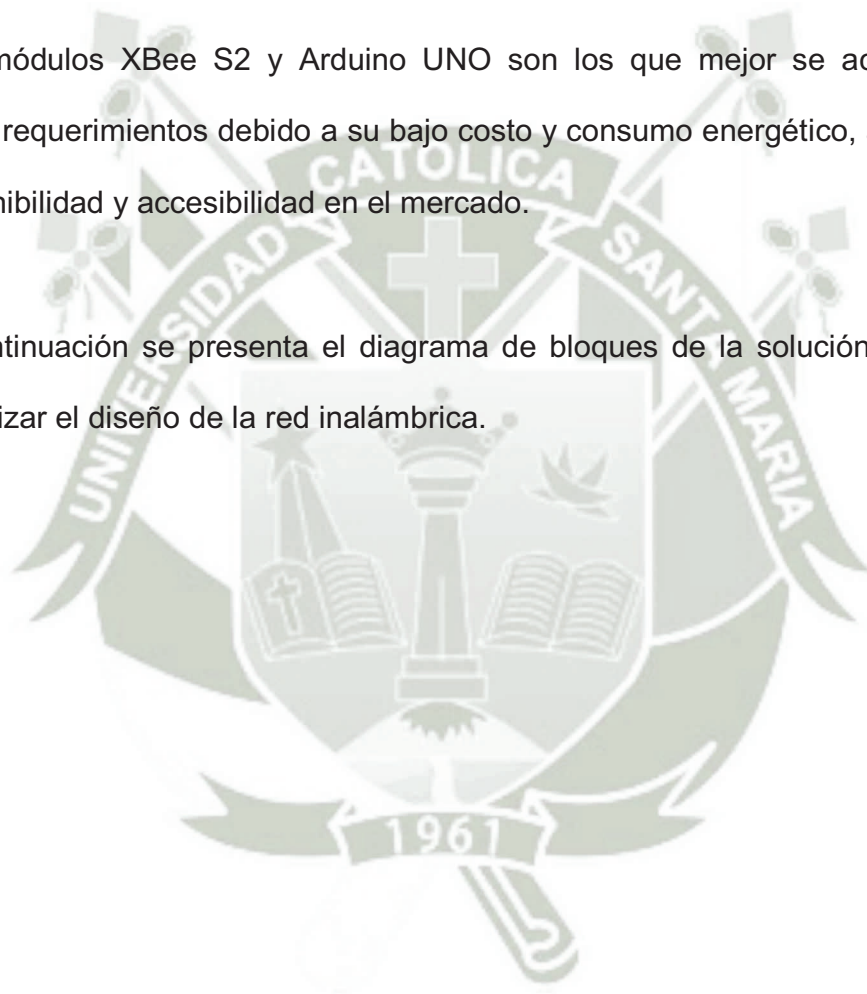
Tras este análisis, se ha decidido usar la tecnología ZigBee mediante el uso de módulos inalámbricos XBee S2 por diversos motivos:

- Estos módulos inalámbricos son adecuados para hacer redes sensoriales.
- Aceptan diferentes tipos de topologías como estrella, punto a punto, malla, árbol.
- Tienen una tasa de transferencia baja de bps, el consumo es reducido y con un ancho de banda de 250 Kbps.
- Su funcionamiento es por radio frecuencia, opera en la banda libre de ISM 2.4 GHz para conexiones inalámbricas.
- Posee E/S digitales, además un Convertidor A/D con 4 entradas analógicas o 4 E/S digitales.
- Alcance de 100 a 120 metros en campo abierto y de 30 a 40 metros en interiores.
- Para su uso, solo es necesario una PC, el cable de comunicación con la PC, y la alimentación del módulo que vaya unido al emisor.
- Para esta aplicación nos resulta muy beneficioso optar por la comunicación inalámbrica, ya que no vamos a tener el problema ni el costo que generaría utilizar una red cableada.
- Software gratuito, DIGI es el proveedor del *software*, el nombre de este *software* es X-CTU, que permite configurar los parámetros del módulo, es como trabajar con Hyperterminal.
- En nuestro proyecto usaremos un Kit formado por un Arduino UNO y un módulo de comunicación inalámbrica XBee S2, que será el encargado de dar la conexión a la PC.

Al utilizar la red inalámbrica con el estándar inalámbrico ZigBee, se presenta como la mejor alternativa para implementar el sistema con redes inalámbricas de sensores para poder recopilar datos de Humedad de suelo, Humedad y Temperatura relativa, con aplicación en Agricultura de Precisión.

Los módulos XBee S2 y Arduino UNO son los que mejor se acomodan a nuestros requerimientos debido a su bajo costo y consumo energético, además de su disponibilidad y accesibilidad en el mercado.

A continuación se presenta el diagrama de bloques de la solución planteada para realizar el diseño de la red inalámbrica.



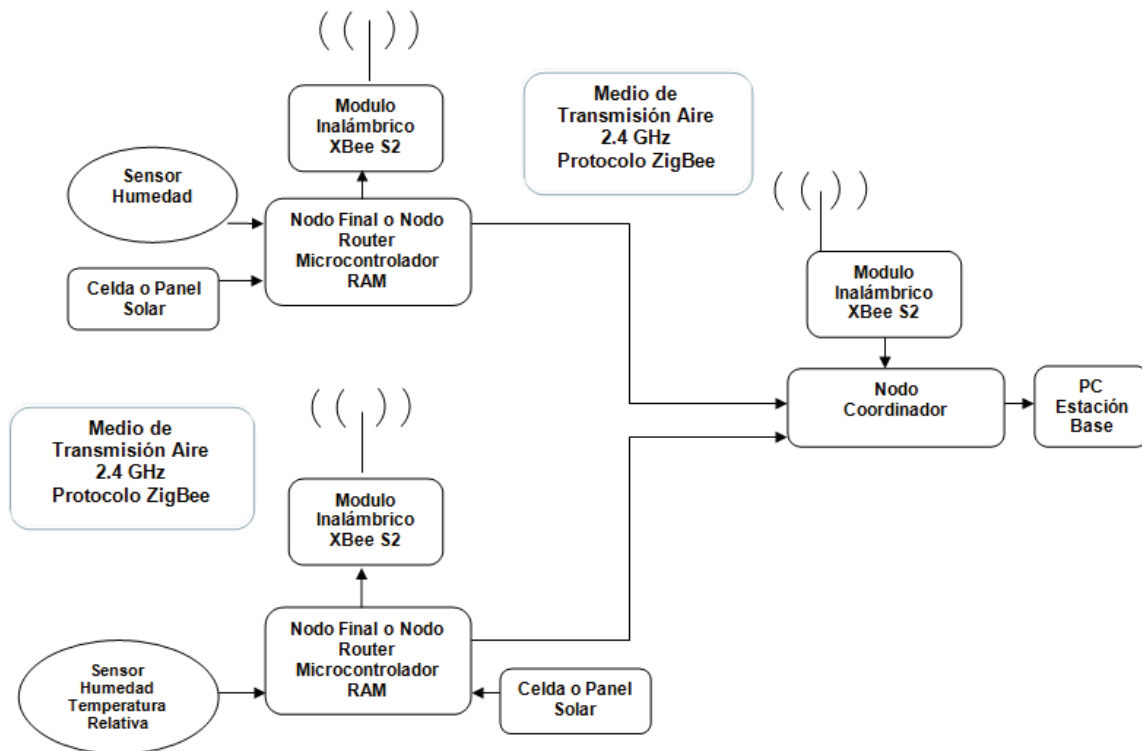


Figura 3.1: Diagrama de bloques de la red inalámbrica a diseñar

Se hará una breve descripción de cada elemento de la figura 3.1:

- Los sensores responden a cambios en el ambiente o entorno produciendo señales eléctricas. Tal y como se ha mencionado anteriormente, los sensores de hoy en día son capaces de obtener información de casi todo y en particular para ésta aplicación se cuenta con sensores de humedad-temperatura relativa y humedad de la tierra.

- En el nodo final o nodo router se encuentra el trabajo del microcontrolador que en aplicaciones más básicas se encarga de convertir tan solo el impulso analógico en digital y transmitirlo vía wireless por medio del modulo inalámbrico XBee S2, para ello deberá crear la trama de datos a transmitir.
- El trabajo a este nivel había sido hecho hasta ahora por data loggers como se ha mencionado anteriormente, pero tienen el inconveniente de que vienen pre programados de fábrica para aplicaciones específicas y sencillas que sólo son capaces de funcionar con sensores de su misma familia. Existen sin embargo algunos que son programables pero que elevan considerablemente su precio.
- El nodo Final o nodo Router, van a ser alimentados con energía renovable por medio de celdas o paneles solares, para asegurar la dotación de energía de los módulos. Si utilizamos nodos finales, se podría configurar su modo Sleep y ahorrar energía.
- La comunicación es realizada de manera inalámbrica, el medio de transmisión y recepción es el aire, 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. Se va a transmitir la información vía inalámbrica al nodo Coordinador donde se podrán monitorear los datos para después tomar las medidas necesarias frente a inconvenientes o anomalías que se presenten.
- Finalmente en la PC o estación base, la información o data transmitida va a ser almacenada para usos futuros en comparaciones o generar gráficos del comportamiento periódico de Humedad y Temperatura, con ello tomar las

medidas correspondientes, según sea necesario para cada cultivo o estado del terreno.

El diseño de la red contempla un total de dos nodos finales o nodos router con sensores distribuidos por toda el área, así como un nodo coordinador, lo que hace un total de 3 dispositivos, siendo factible agregar más nodos para ampliar nuestra red. Los nodos deben tener la capacidad de movilidad dentro del área determinada sin que exista pérdida en la comunicación. Deberán trabajar en la frecuencia de 2.4 GHz y siempre considerar la distancia máxima de 120 metros en exteriores establecida en la hoja de datos.

Además deben cumplir con la sensibilidad de recepción establecida en la hoja de datos de -97 dBm, claro está que éste valor es un punto máximo un valor teórico ya que en la práctica debe llegar a valores cercanos al establecido. Debemos considerar el caso en que no se alcance dicho valor, se deberá en gran parte a factores externos que causen pérdida en la sensibilidad de recepción, pero buscando siempre que no se generen gran pérdida de paquetes, para asegurar una óptima comunicación inalámbrica.

Los dispositivos finales o nodos router tendrán conectados los sensores necesarios, para realizar la toma de datos de Temperatura y Humedad relativa así como Humedad del suelo y de manera inmediata o posterior tomar acciones al

respecto. En la figura 3.2 podemos ver de manera simplificada los pasos de esta comunicación que se explicarán con detalle en los siguientes puntos.

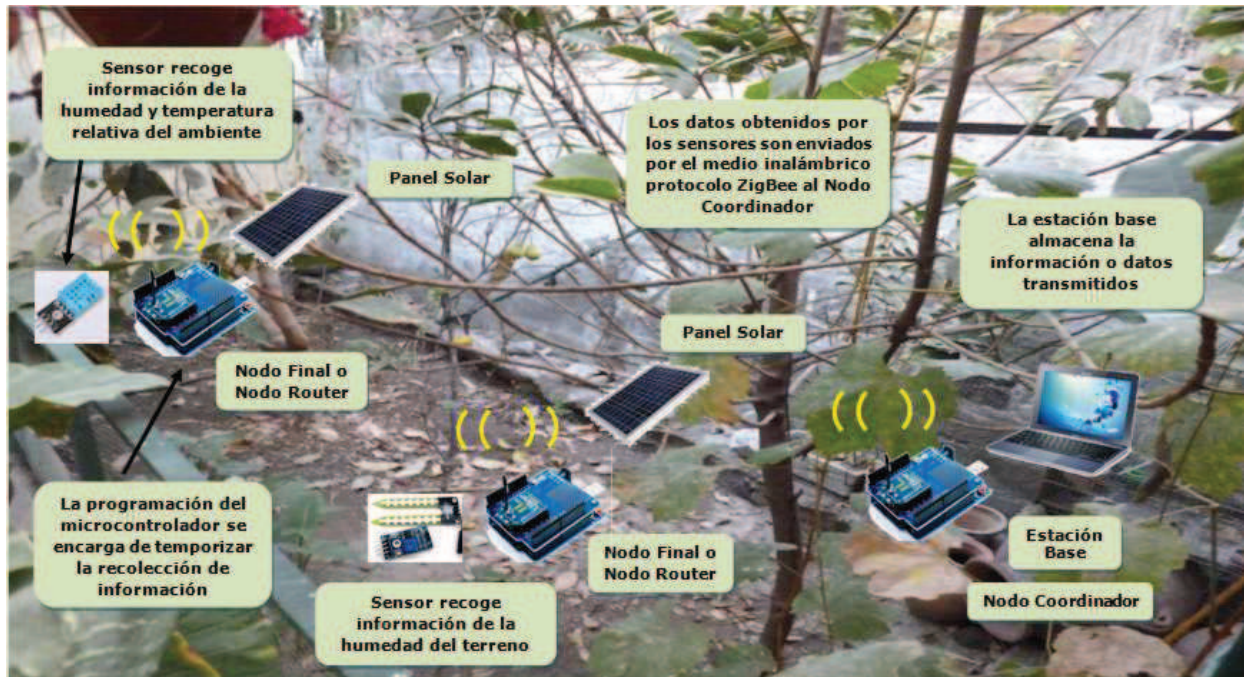


Figura 3.2: Esquema de comunicación WSN

3.2 MÓDULO XBEE S2

3.2.1 Configuraciones Modo Comando para módulo inalámbrico

Para modificar o leer parámetros del módulo de radio frecuencia, se debe ingresar al Modo Comando, se soportan dos modos de comando en la actualidad, AT Command Mode y API Command Mode.

El modo más común es el modo comando AT, éste modo permite ingresar comandos AT al módulo XBee S2 de esta manera ajustar parámetros como la dirección propia o la de destino, así como su modo de operación entre otras cosas. Para poder ingresar los comandos AT es necesario utilizar el Hyperterminal de Windows, el programa X-CTU o algún microcontrolador que maneje UART y tenga los comandos guardados en memoria.

Para ingresar a este modo:

- Se debe esperar un tiempo dado por el comando GT (Guard Time, por defecto ATGT=0x3E84 que equivalen a 1000 ms)
- Luego ingresar +++ y luego esperar otro tiempo GT.
- Como respuesta el módulo entregará un OK.
- Si por el contrario no se ejecuta o recibe, enviará un mensaje "ERROR"

El módulo XBee S2 viene por defecto con una velocidad de 9600 bps. En caso de no poder ingresar al modo de comandos, es posible que se deba a la diferencia de velocidades entre el módulo y la interfaz que se comunica vía serial.

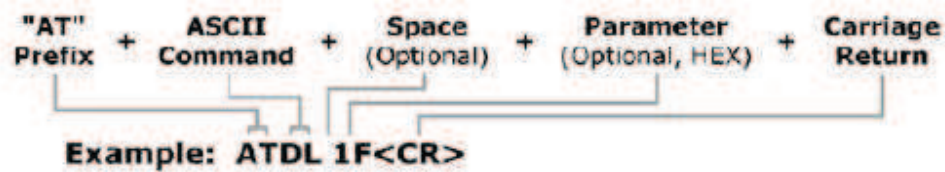


Figura 3.3: Ejemplo Comando AT

En la Figura 3.3 se observa la forma de un comando AT. Luego de ingresar a este modo, se debe ingresar el comando deseado para ajustar los parámetros del módulo XBee S2.

Por ejemplo si se desea modificar la dirección de origen del módulo de 16-bit (con el comando MY), se debe ingresar:

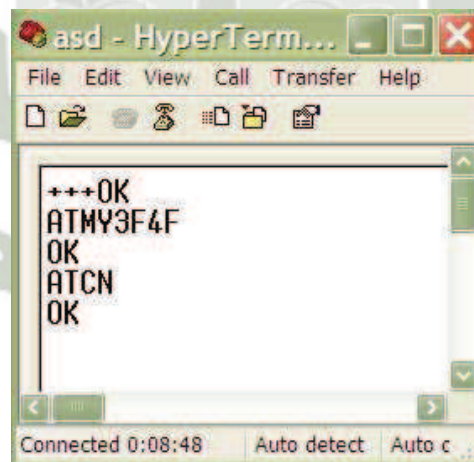


Figura 3.4: Ejemplo escritura de parámetros

En el ejemplo anterior, la dirección asignada equivale a 0x3F4F. Se observa que primero se ingresa al modo de comandos AT, recibiendo un OK de respuesta. Luego se ingresa el comando ATMY3F4F y se presiona ENTER o caracter <CR><LF> (Carrier Return y Line Feed) si se maneja desde un microcontrolador. Con ello se recibe un <CR><LF>OK<CR><LF> como respuesta.

Para salir del modo de Comandos se ingresa ATCN y se presiona ENTER. En caso de que no se ingrese ningún comando AT válido durante el tiempo determinado por CT (Command Mode Timeout), el módulo se saldrá automáticamente. Para que los cambios realizados tengan efecto se debe ingresar el comando ATWR para guardar los cambios en la memoria no volátil del módulo. Para consultar por algún comando se ingresa el comando directamente sin ningún parámetro, en el ejemplo anterior se ingresaría ATMY. La siguiente figura muestra lo anterior:

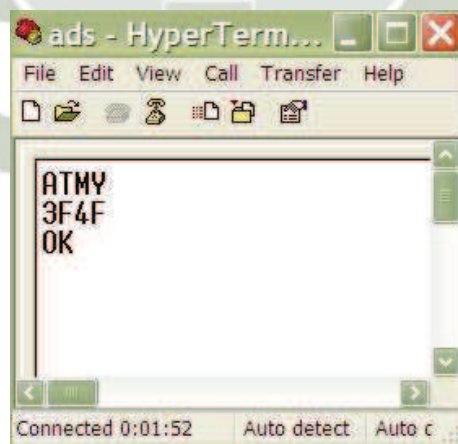


Figura 3.5: Ejemplo lectura de parámetros

Se observa que se ingresa ATMY, donde el módulo responde con un 3F4F, que es la dirección que tiene configurada, y luego con un OK.

3.2.2 Software X-CTU

Es posible utilizar Hyperterminal de Windows para configurar un módulo XBee S2 pero también se puede realizar con el software X-CTU. Mediante este software de DIGI International (fabricante de los módulos XBee) podemos configurar el módulo de manera más sencilla, así mismo podremos realizar las distintas actualizaciones de firmware necesarias para cada uno de los nodos (Coordinador, Router y Final con sensor).

Para adquirir este software de uso gratuito, debemos acceder a la página Web de DIGI International <http://www.digi.com/support/productdetail?pid=3352&type=utilities> y simplemente descargarlo.



Figura 3.6: Página Web de DIGI International

A continuación se explican las herramientas u opciones asociadas al software X-CTU que nos permitirán configurar los módulos XBee S2, como son: “PC Settings”, “Range Test”, “Terminal” y “Modem Configuration”.

a) Configuración de PC “PC Settings”

En la pestaña llamada PC Settings se configura los parámetros para una óptima comunicación entre la PC y el módulo XBee S2. Por ejemplo es posible

configurar el número y la velocidad del puerto serial, así como la paridad, entre otras cosas. Permite configurar opciones más generales para los comandos AT, como el signo elegido para ingresar en modo de comandos que por defecto corresponde al signo + (2B en hexadecimal).

Además, contiene un cuadro que permite seleccionar el puerto con el que se desee trabajar.

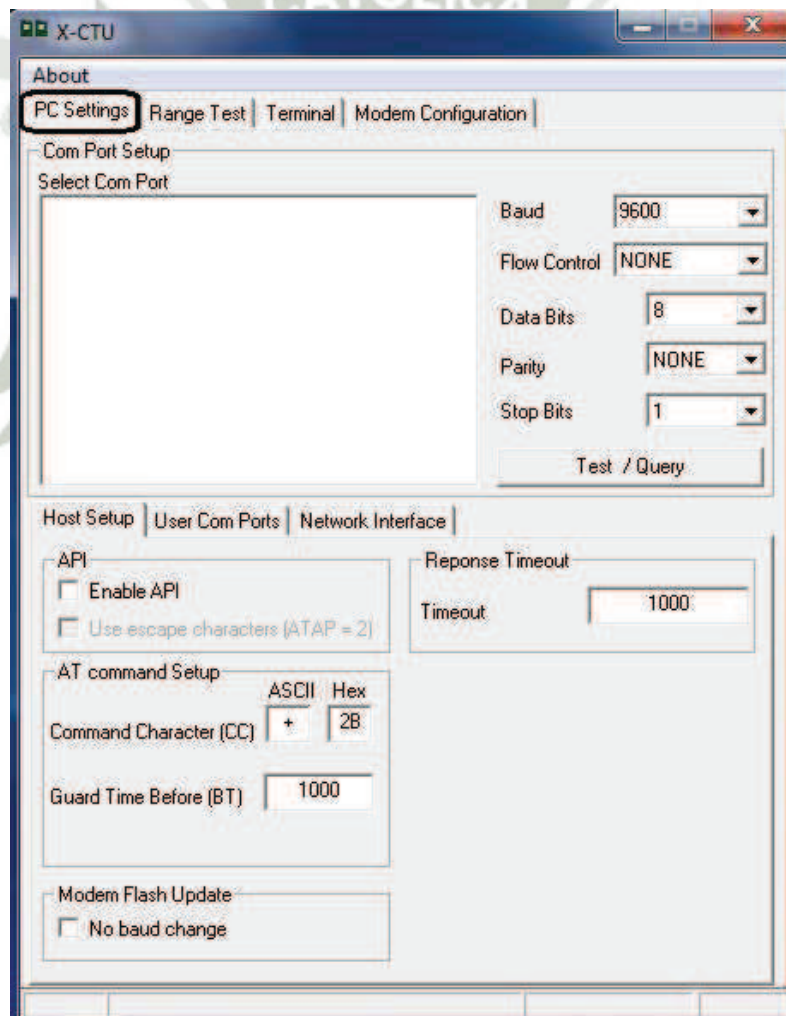


Figura 3.7: Opción “PC Settings”

b) Rango de Testeo “Range Test”

En la pestaña Range Test, es posible enviar una cadena de datos de cualquier tipo para probar el rango de alcance de la señal. Esto genera automáticamente datos que los envía por el módulo y de esta manera poder verificar cuales datos llegan buenos y cuáles no y a partir de este registro determinar experimentalmente el rango o alcance de la señal bajo un área de trabajo determinada.

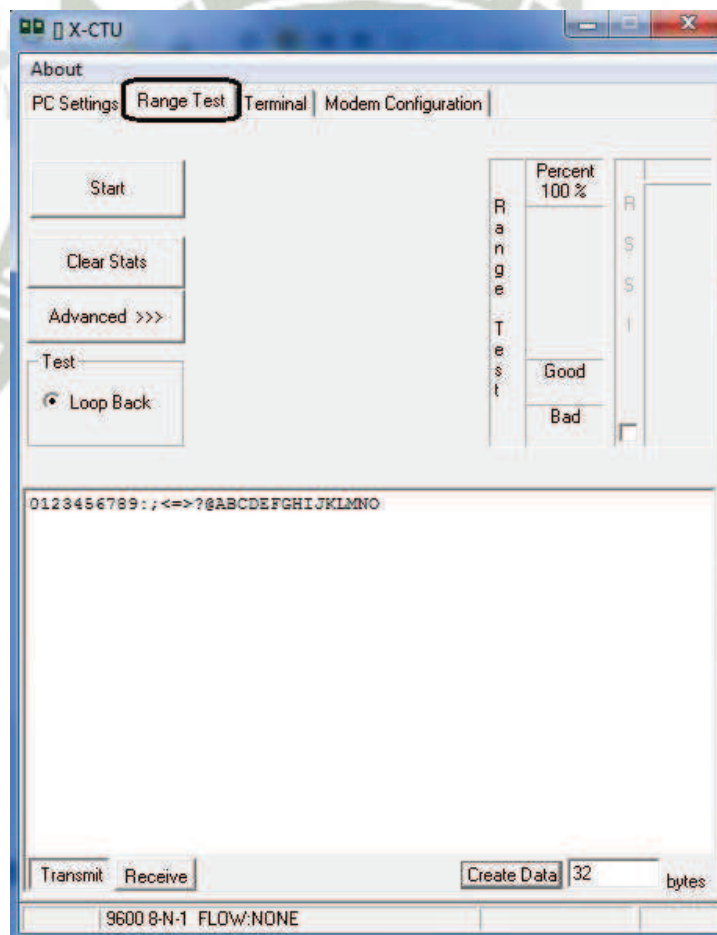


Figura 3.8: Opción “Range Test”

c) Equipo Terminal “Terminal”

En la pestaña de Terminal, el funcionamiento es idéntico al del Hyperterminal, todo lo escrito aquí, entra directamente al módulo como si estuviera en el modo de comandos. Además podremos visualizar los datos recibidos. Estos pueden ser mostrados en ASCII o Hexadecimal.

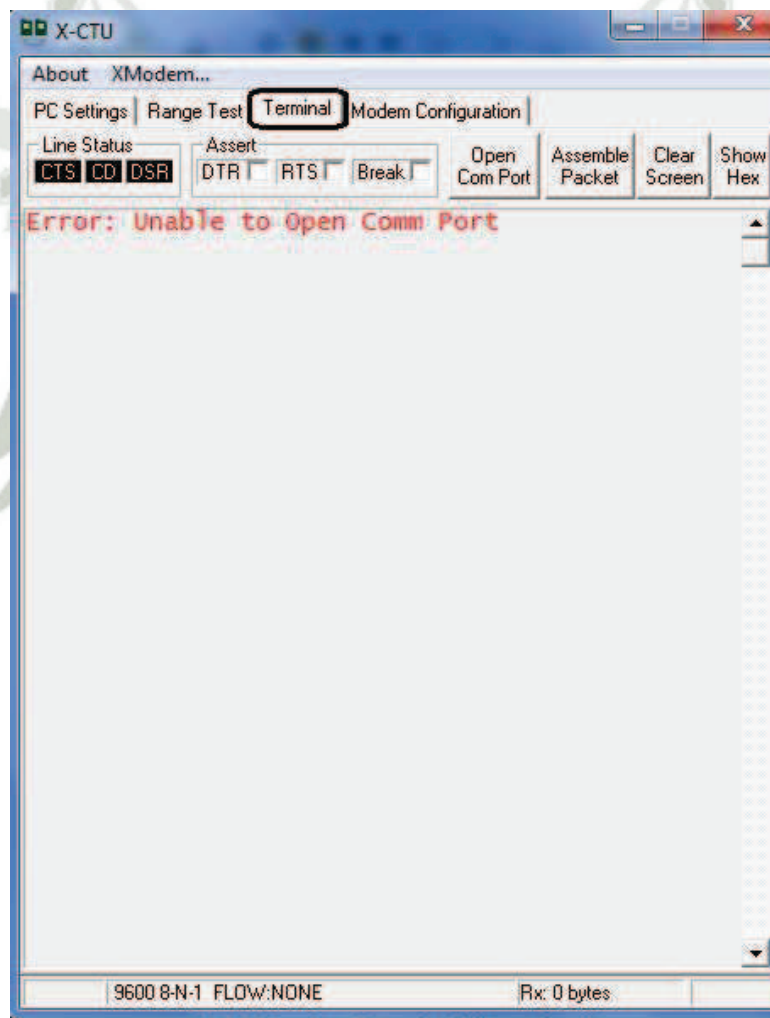


Figura 3.9: Opción “Terminal”

d) Configuración de Modem “Modem Configuration”

Esta pestaña de MODEM Configuration nos permite leer, guardar o cargar cierta configuración predeterminada además de ver cómo está configurado cada módulo, cambiar alguna característica o luego guardarla o cargarla de alguna previamente guardada.

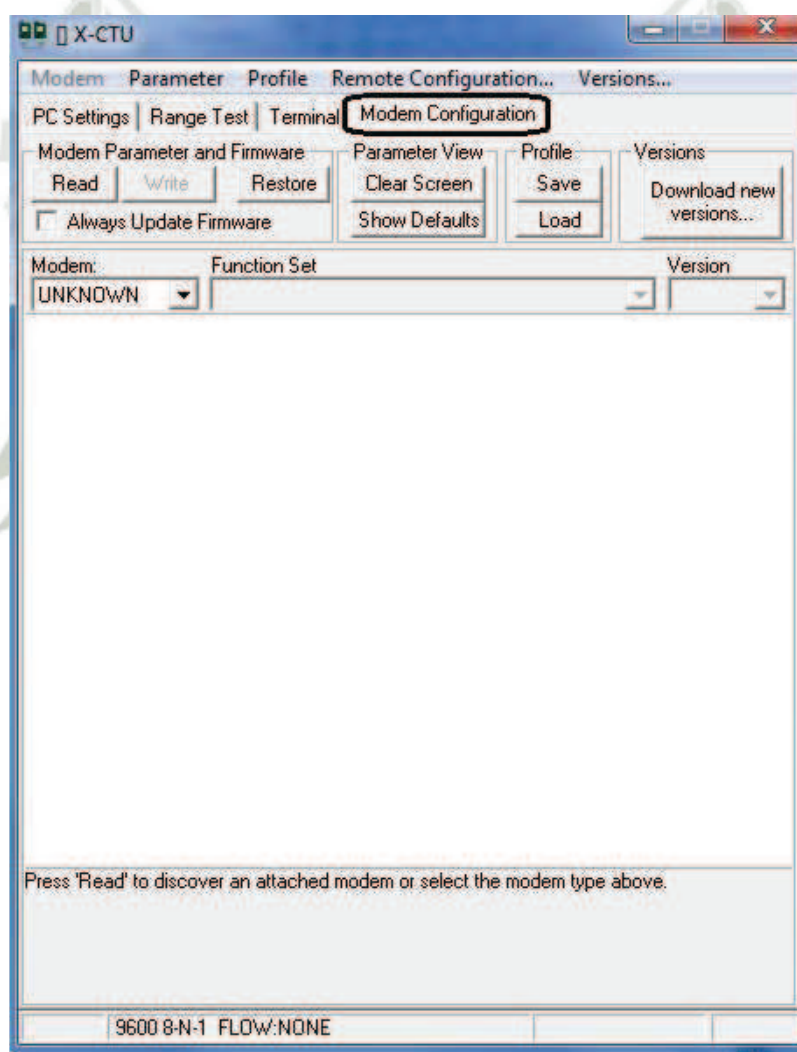


Figura 3.10: Opción “Modem Configuration”

3.2.3 PC

La PC es usada para mostrar y almacenar los datos obtenidos por los sensores localizados en los nodos Finales o nodos Router. Se utiliza la comunicación serial para enviar datos a nuestro Arduino UNO, visualizarlos y almacenarlos en la PC.

Todas las placas Arduino tienen al menos un puerto serie, también conocido como UART o USART. Se comunica a través de los pines digitales 0 (RX) y 1 (TX), así como con el ordenador mediante USB.

Estos datos son visualizados mediante una secuencia de bytes usando el programa X-CTU. La PC y el XBee S2 se comunican usando el Shield XBee S2 de Arduino UNO.

3.3 CÁLCULOS PARA EL DISEÑO DE LA TOPOLOGÍA DE RED FÍSICA Y DE ANTENAS PARA EL DESPLIEGUE

ZigBee está preparado para trabajar con topologías en estrella, malla o en árbol. Una topología punto a punto no tendría mucho sentido (estas se pueden conseguir con 802.15.4 Series 1 sin necesidad de ZigBee) ya que solo los dispositivos finales pueden dormir. Las topologías en mallado (Mesh) podrían ser interesantes, para trabajar con una topología mallada real se debe hacer uso de protocolos tales como DigiMesh.

Es por ello que para nuestro diseño y según nuestra aplicación utilizaremos la topología en estrella pensando en la futura expansión del proyecto. También se puede obviar el uso del nodo Router por el área de nuestro prototipo de terreno de cultivo, en el caso de trabajar con un tipo mallado.

3.3.1 Zona de Fresnel

Se define la Zona de Fresnel como el lóbulo de cobertura de las antenas que ha de estar libre de obstáculos para que la comunicación entre dos puntos sea adecuada. En la figura 3.11 a) y b) se aprecia de manera sencilla la definición de éste concepto. En la primera de las imágenes a) se ve como la señal llega al destino por dos vías diferentes donde se puedan generar interferencias o datos duplicados o erróneos (reflexión).

Según las características de nuestro proyecto no existirán problemas de línea de vista porque tenemos un área libre de árboles u obstáculos de grandes dimensiones que puedan impedir la comunicación inalámbrica. Si debemos tener cuidado con la reflexión del terreno que podría generar algunos problemas.

Para evitar dicho panorama debemos calcular el radio r de la figura b) para dejar libre de obstáculos la señal.

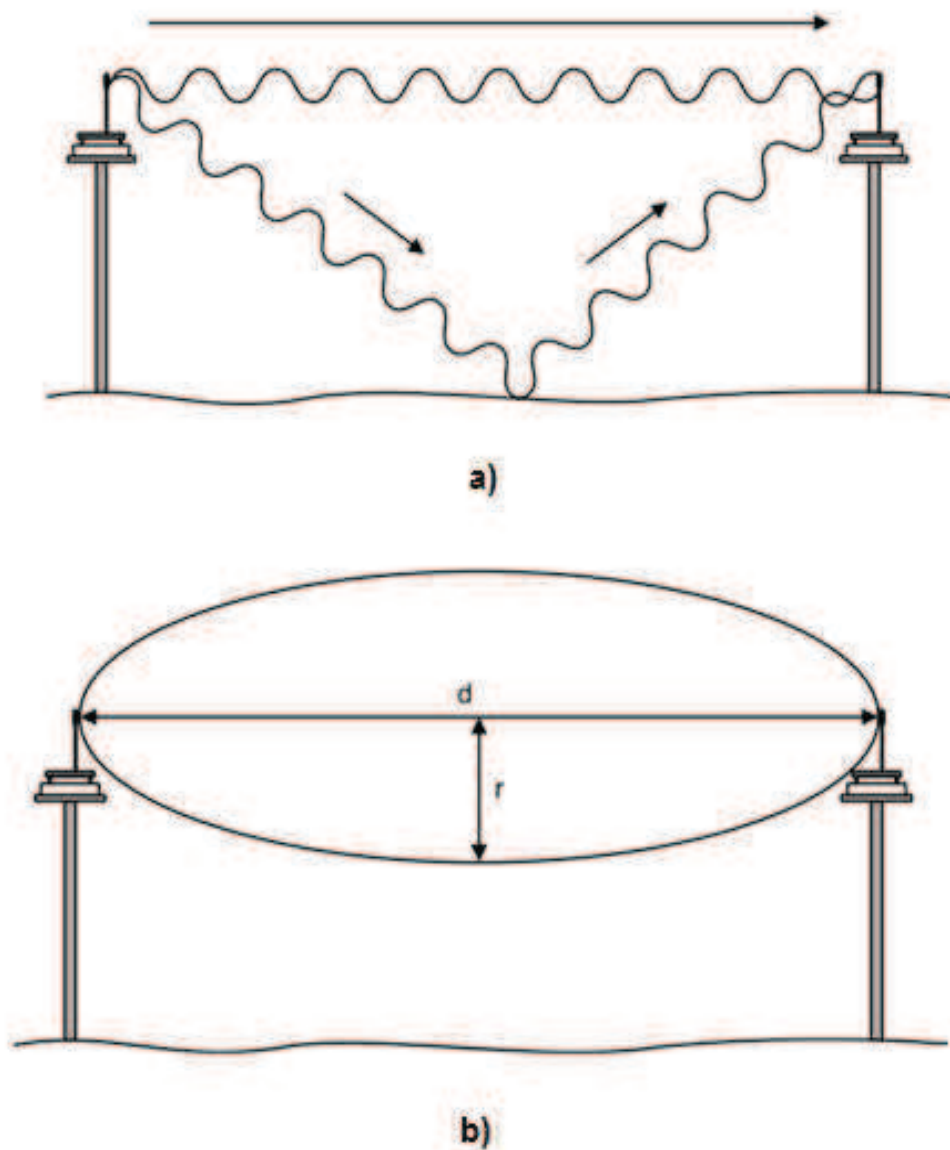


Figura 3.11: Zona Fresnel a) y b)

Fórmula para calcular el radio:

$$r_m = 17.32 \sqrt{\frac{d_{Km}}{4f_{Ghz}}}$$

Fórmula 3.1: Radio de Zona de Fresnel

El Radio r , es el radio óptimo para evitar la reflexión por parte del suelo y que éste se convierta en un obstáculo, se da en metros, la distancia en Kilómetros y la frecuencia en Gigahertz.

Entonces, tenemos una distancia (d), de *4 metros* que es una distancia aproximada de la ubicación de los nodos según el área del prototipo del terreno de cultivo y una frecuencia (f), de *2.4 GHz*, aplicando la fórmula 3.1:

$$r = 17.32 \sqrt{\frac{0.004}{4(2.4)}}$$

$$r = 0.353 \text{ metros}$$

Se estima pues que para una distancia de 4 metros la altura ideal de la antena será de aproximadamente 0.353 metros. Por lo que en el estudio de cobertura se ha tomado este radio como referencia general.

Es importante cumplir con estos requisitos para evitar los problemas anteriormente descritos y poder optimizar el consumo de la potencia de los dispositivos inalámbricos.

3.3.2 Cálculo de la ganancia de la antena

Para calcular la ganancia de la antena tanto para la transmisión como recepción, usamos la siguiente fórmula:

$$G(dB) = 10 \text{Log}(P_{em})$$

Fórmula 3.2: Ganancia de la Antena

Donde

- P_{em} (mW) = Potencia de emisión

Reemplazando $P_{em} = 2mW$ según hoja de datos de XBee S2 en la fórmula 3.2 tenemos:

$$G(dB) = 10 \text{Log}(2)$$

$$G(dB) = 3.01$$

3.3.3 Cálculo de la longitud de onda de la antena

Para calcular la longitud de onda de la antena tanto para el módulo de transmisión como de recepción, usamos la siguiente fórmula:

$$\lambda = \frac{C}{f}$$

Fórmula 3.3: Cálculo de longitud de onda

Donde,

- $C = 3 \times 10^8$ m/s velocidad de la luz
- f = frecuencia en MHz

Reemplazando en la fórmula 3.3 tenemos:

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{2.4 \times 10^9}$$

$$\lambda = 0.125m$$

Debido a que usamos un módulo XBee, el cual viene con una antena monopolo vertical omnidireccional, de $\frac{1}{4}$ de onda, entonces la longitud de onda viene a ser:

$$\lambda = \frac{\lambda}{4} = \frac{0.125}{4} = 0.03125m$$

Entonces la longitud de onda de la antena de nuestros módulos de transmisión y recepción es igual a:

$$\lambda = 0.3125 \text{ m } \text{ ó } \lambda = 3.125 \text{ cm}$$

3.3.4 Cálculo relación Potencia vs. Distancia

Cuando transmitimos información de un nodo a otro en una red inalámbrica y al considerar que la distancia u obstáculos atenúan demasiado la señal, incrementar la potencia de transmisión no es la mejor solución. Teniendo en cuenta que el uso de la energía se convierte en una necesidad a tener muy en cuenta, es aconsejable no aumentar la potencia de transmisión sino utilizar nodos

intermedios a modo de repetidores creando un camino multi-salto, ya sea para disminuir la distancia entre nodos o para esquivar algún obstáculo que pudiera existir.

Teniendo en cuenta la frecuencia trabajo en esta relación de potencia y distancia, tenemos que frente a una menor frecuencia es capaz de tener mayor cobertura ante una misma potencia de transmisión. Usualmente la relación Potencia Transmitida versus Distancia entre nodos se calcula con la siguiente fórmula cuyos resultados se presentan en la figura 3.13.

$$P_R(d) = P_t + G_t - \overline{PL}(d) + G_r$$

Fórmula 3.4: Relación Potencia y Distancia

Donde:

- P_t = la potencia de transmisión
- G_r = ganancia de recepción de la antena
- G_t = ganancia de transmisión de la antena
- $\overline{PL}(d)$ = el promedio de pérdida para una distancia "d"

Reemplazamos en la fórmula 3.4, el valor de

- $\overline{PL}(d)$ calculado
- $G_r = G_t = 3 \text{ dBm}$
- $P_t = 2 \text{ mW}$ (3dBm)

$$P_R(d) = P_t + G_t - \overline{PL}(d) + G_r$$

$$P_R(d) = 3 + 3 - 102.59$$

$$P_R(d) = -96.59 \text{ dB}$$

Calculamos el promedio de pérdida para una distancia "d", $\overline{PL}(d)$ con la siguiente fórmula:

$$\overline{PL}(d) = PL_0(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma$$

Fórmula 3.5: Promedio de pérdida para una distancia "d"

Donde:

- $PL_0(d_0)$ = pérdida de distancia por espacio libre para una distancia de referencia d_0
- n = exponente de pérdidas en el camino

- $X\sigma$ = término de shadowing
- d = distancia de propagación entre las antenas
- d_0 = distancia de referencia
- donde $d \geq d_0$

Condiciones del entorno que determinan el valor de n :

| Entorno | n |
|---------------------------------|-----------|
| Espacio libre | 2 |
| Reflexión especular ideal | 4 |
| Entorno urbano | 2.4 - 3.5 |
| Entorno urbano (shadowing) | 3 - 5 |
| En edificios(visión directa) | 1.6 -1.8 |
| En edificios(camino obstruido) | 4 - 6 |
| En industria (camino obstruido) | 2 - 3 |

Valores de d_0 :

| Valores típicos de d_0 |
|------------------------------|
| Celdas grandes (rural): 1 km |
| Microceldas (urbano): 100 m |
| Indoor (WLAN) : 1 m |

Reemplazando en la fórmula 3.5 los valores de:

- $PL_0(d_0) = 52.09$
- $n = 3$ (entorno urbano)
- $X_\sigma = 32.44$
- $d = 4 \text{ m}$
- $d_0 = 1 \text{ m}$ (Indoor-WLAN)

$$\overline{PL}(d) = PL_0(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma$$

$$\overline{PL}(d) = 52.09 + 10 \times 3 \log_{10} \left(\frac{4}{1} \right) + 32.44$$

$$\overline{PL}(d) = 52.09 + 18.06 + 32.44$$

$$\overline{PL}(d) = 102.59$$

Para calcular la pérdida de distancia por espacio libre $PL_0(d_0)$ aplicamos la siguiente fórmula:

$$PL_0(d_0) = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)$$

Fórmula 3.6: Pérdida de distancia por espacio libre $PL_0(d_0)$

Donde,

- λ = longitud de onda para la frecuencia elegida
- d = distancia de propagación entre las antenas.

Reemplazando $\lambda = 0.3125m$ y $d = 4$ m, en la fórmula 3.6 tenemos:

$$PL_0(d_0) = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)$$

$$PL_0(d_0) = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi 4}{0.125} \right)$$

$$PL_0(d_0) = 52.09 \text{ dB}$$

Con los datos calculados podemos estimar la relacion Potencia Versus distancia para una frecuencia de 2.4 GHz, figura 3.12 .

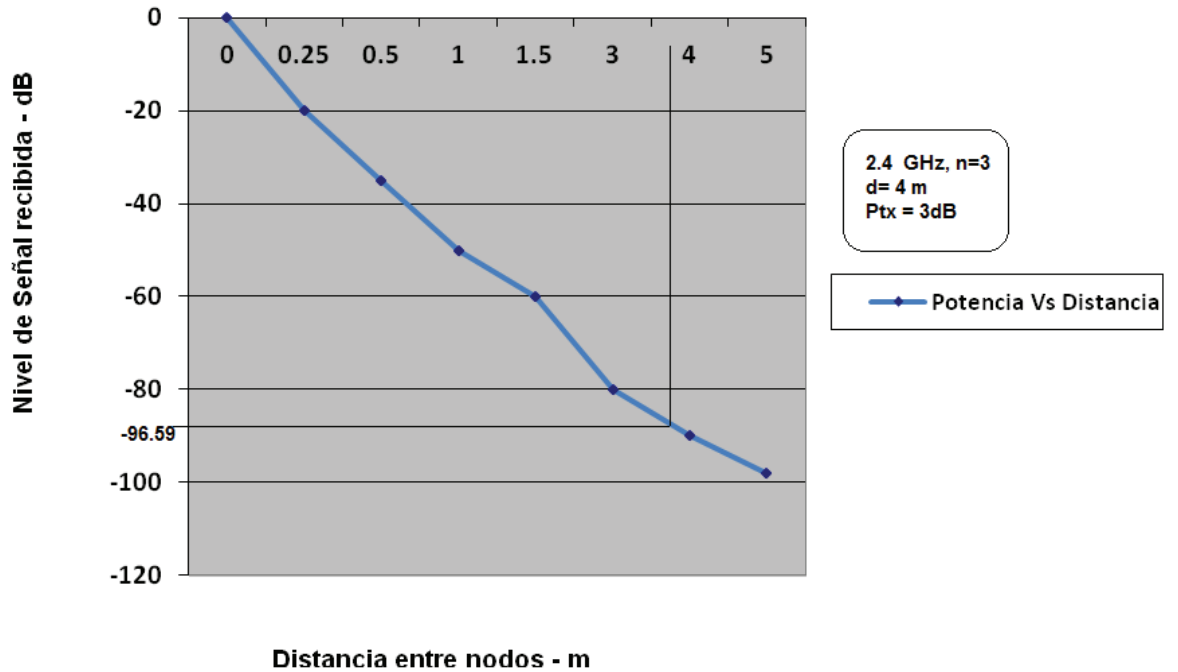


Figura 3.12: Gráfica relación Potencia vs. Distancia para la frecuencia de 2.4 GHz

3.3.5 Relación Cantidad de nodos vs. Throughput

Como se ha mencionado anteriormente que muchas veces es mejor colocar un nodo intermedio en la red antes que elevar la potencia de transmisión, se presenta una nueva limitación, el throughput.

Se puede definir el throughput o caudal como la cantidad de información que fluye a través de un sistema o una red de datos, es decir es el nivel de utilización real del enlace.

A más nodos que tenga la red, menos será el throughput alcanzable. Investigaciones recientes en el tema demuestran que el throughput de la red decae en función del número de nodos N según la función:

$$\text{Throughput} = \frac{1}{\sqrt{N}}$$

Formula 3.7: Cálculo de Throughput

Entonces en nuestra red poseemos 4 nodos, aplicando la fórmula

$$\text{Throughput} = \frac{1}{\sqrt{4}}$$

Obtenemos que el throughput alcanzable de nuestra red utilizando 4 nodos sea de 0.5.

Podemos decir que el throughput también está asociado a la cantidad de transmisiones sin error que la red es capaz de lograr y eso muchas veces depende del protocolo a usar y de la capacidad de canal que disponen así como la movilidad que tendrán en la red inalámbrica.

3.4 POSICIONAMIENTO DE NODOS EN PROTOTIPO

Se ha ubicado el nodo final o router y coordinador tratando de abarcar la mayor área posible y de esta manera poder expandir y hacer más escalable la red inalámbrica.

El nodo Coordinador funcionará también como Estación Base para la red, se ha posicionado junto con la PC responsable de la zona agraria ya que allí se almacenarán y se manejarán los datos transmitidos desde los sensores, tendrá que estar en lugar accesible. Este nodo podrá disponer a futuro de una conexión a Internet para acceder a los datos.

En cuanto al resto de nodos: existe una gran variedad de posibilidades a la hora de seleccionar una topología de red física ya que el máximo rango de trabajo de las radios XBee Series 2 es de hasta 120 metros sin obstáculos, pero hay que tener en cuenta que se va a trabajar con prototipo de un terreno agrícola, específicamente un huerto de área pequeña, por lo que no va a haber una gran distancia entre nodos, se harán las pruebas con los nodos, en ambos casos no habrá pérdida de información.

Con todos los puntos mencionados anteriormente, teniendo en cuenta la cobertura según hoja de datos y conociendo las dimensiones del área de trabajo

del prototipo del terreno, hacen que el planteamiento sea como se muestra en la Figura 3.13.

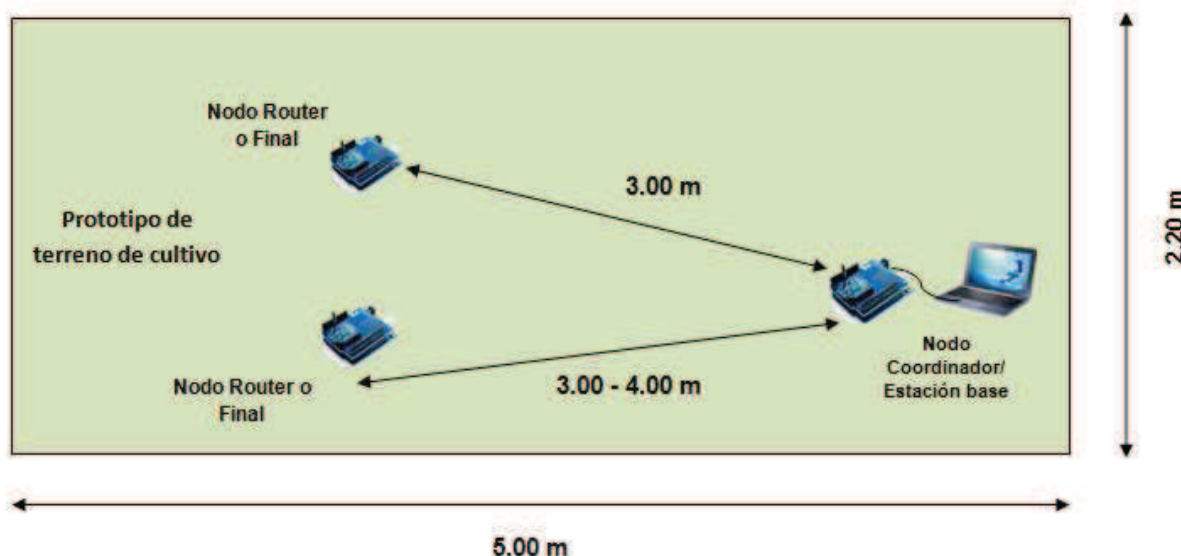


Figura 3.13: Posible ubicación de nodos en prototipo de terreno de cultivo

Se muestra la tabla 3.1 la posible ubicación de cada uno de los nodos, para tener una localización más precisa y exacta, se utilizó Google Maps para obtener las coordenadas de cada Nodo en el prototipo del terreno de cultivo.

| Posición de Nodos | | |
|----------------------------------|---------------|---------------|
| Nodo | Latitud | Longitud |
| Coordinador/Estación Base | 16°24'46.35"S | 71°32'24.04"O |
| Final o Router/Sensor F1 | 16°24'46.20"S | 71°32'24.13"O |
| Final o Router/Sensor F2 | 16°24'46.20"S | 71°32'24.09"O |

Tabla 3.1: Posición de nodos

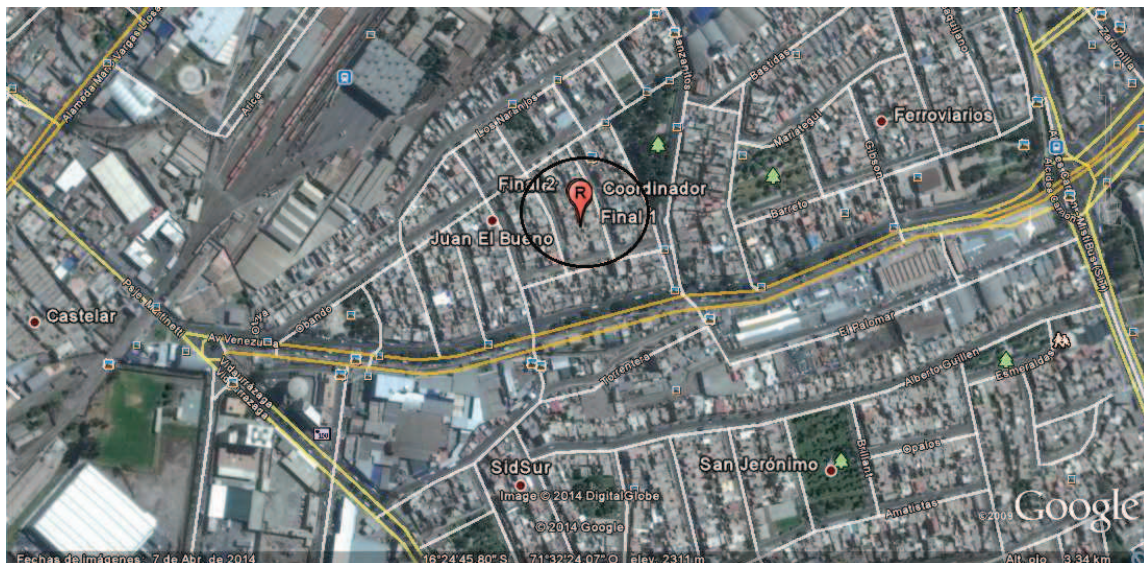


Figura 3.14: Ubicación de nodos en Google Maps

3.5 ESTUDIO DE ALCANCE CON RADIO MOBILE

El estudio de cobertura se realiza mediante la aplicación Radio Mobile, que es un software muy poderoso de distribución libre en su página oficial <http://www.cplus.org/rmw/>, sirve para plotear patrones RF y predecir el funcionamiento de sistemas de radio para frecuencias VHF, UHF y microondas.

El rango de frecuencias en las que trabaja es de 20 MHz a 20 GHz y longitudes de trayecto entre 1 y 2000 Kilómetros. Radio Mobile permite el uso de mapas de elevación de áreas específicas usando archivos de extensión SRTM (Space Shuttle Radar Terrain mapping Mission), adicionando también perfiles de

elevación y rutas de mapa, en los que se puede ubicar las estaciones de radio (Nodos), donde el diseño lo requiera. Esto más un modelado matemático complejo permite a este programa hacer predicciones muy exactas basadas en el funcionamiento de equipos y parámetros reales. El análisis de este programa está basado en el modelo de propagación Terreno Irregular IT (Irregular Terrain) – Longley Rice.

El funcionamiento del enlace puede ser especificado como un sistema donde se especifica los parámetros de funcionamiento de la red. Los parámetros deberán ser introducidos tanto como para el sistema como para las unidades así como las propiedades del mapa.

Los primeros pasos que debemos realizar son:

- Se procederá a descargar los diferentes mapas necesarios para el estudio.
- Se utilizará una coordenada como punto central de posicionamiento del mapa, para posteriormente ir añadiendo los distintos nodos haciendo uso de las coordenadas mostradas en la tabla 3.1.
- Así mismo se configurarán los parámetros de condiciones del entorno (mapa), así como de la antena en uso y parámetros de la red.

3.5.1 Ubicación de nodos

Ubicamos los nodos en el mapa de Arequipa según las coordenadas de la tabla 3.1 y obtenemos la ubicación final de los mismos en Radio Mobile.

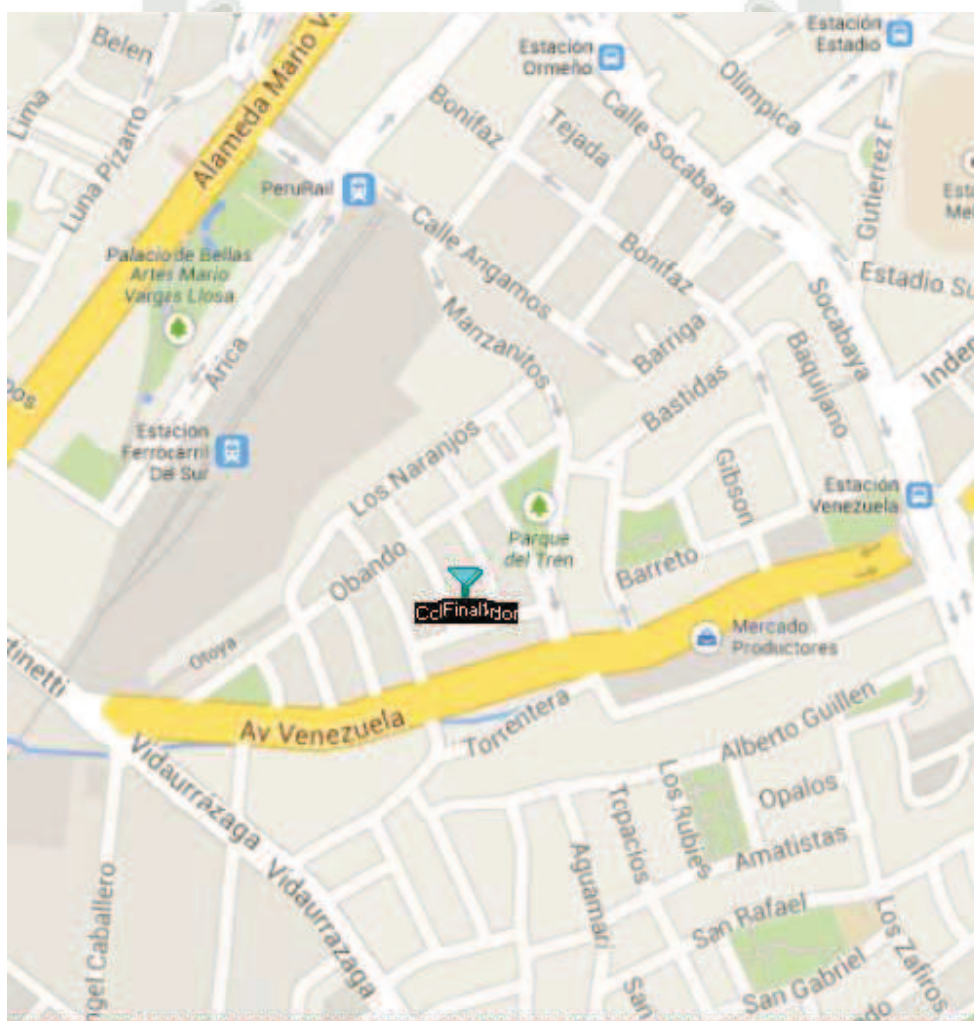


Figura 3.15: Ubicación de los nodos en Radio Mobile

3.5.2 Configuración de Propiedades de las Redes

En la opción de Parámetros seleccionamos la frecuencia mínima y máxima comprendida entre 2.4 GHz, la polarización de nuestra antena, que será vertical, y el clima, que al tratarse de Arequipa que es del tipo templado sub-húmedo con aridez seleccionaremos desierto, el resto de opciones se quedará por defecto.

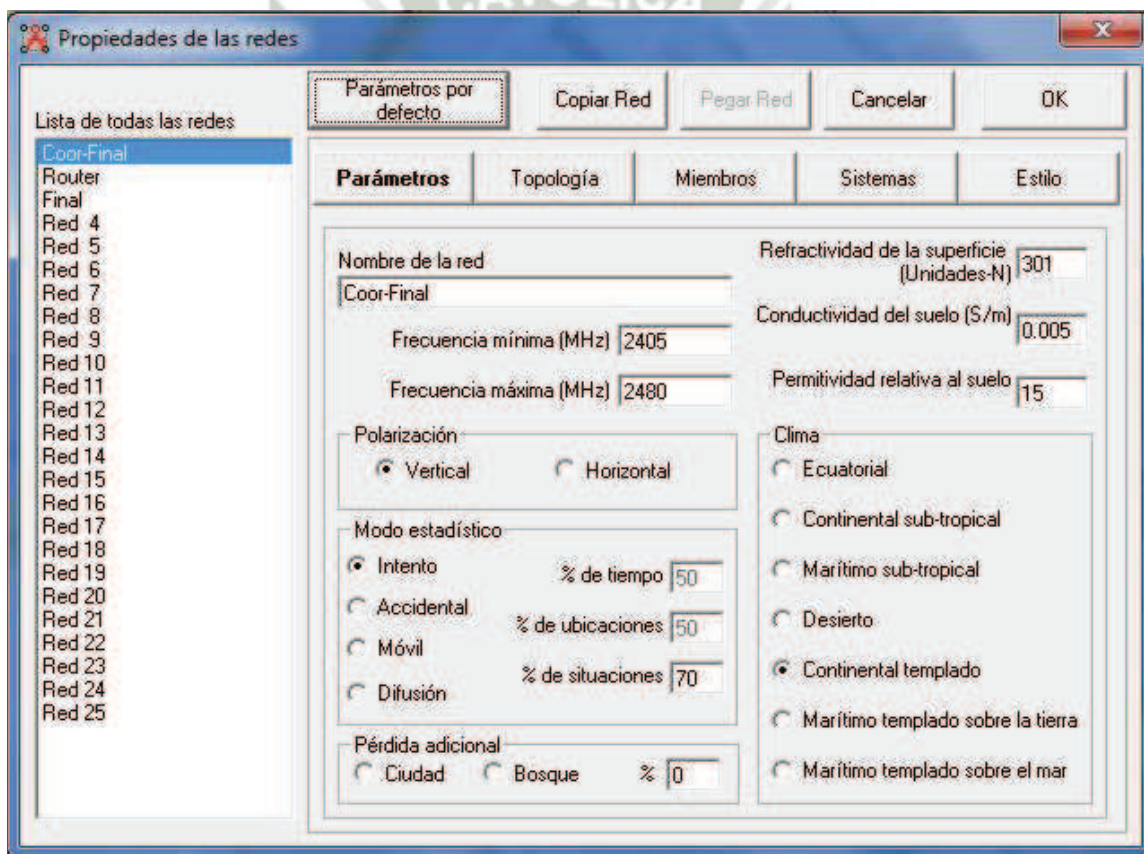


Figura 3.16: Propiedades de las redes

3.5.3 Configuración de Propiedades de las Antenas

En la opción de Sistema se configuran los parámetros de la antena, la potencia de transmisión es de 2 mW para la Serie 2 de XBee. El umbral de recepción de nuestra antena es de -95 dBm y la ganancia de la antena está entre 0 a 2 dBi. La altura será de en 1 metro para realizar esta simulación, aunque para el despliegue de manera real, ésta se deberá ajustar a las alturas definidas en el cálculo de la zona Fresnel (punto 3.3.1), además habrá que tener en consideración la elevación del terreno. La altura de la antena según los resultados obtenidos significará reducir las interferencias y pérdidas causadas por los efectos de reflexión y refracción de la propagación de la onda, que afectarían la calidad de la señal y al envío e interpretación de datos.

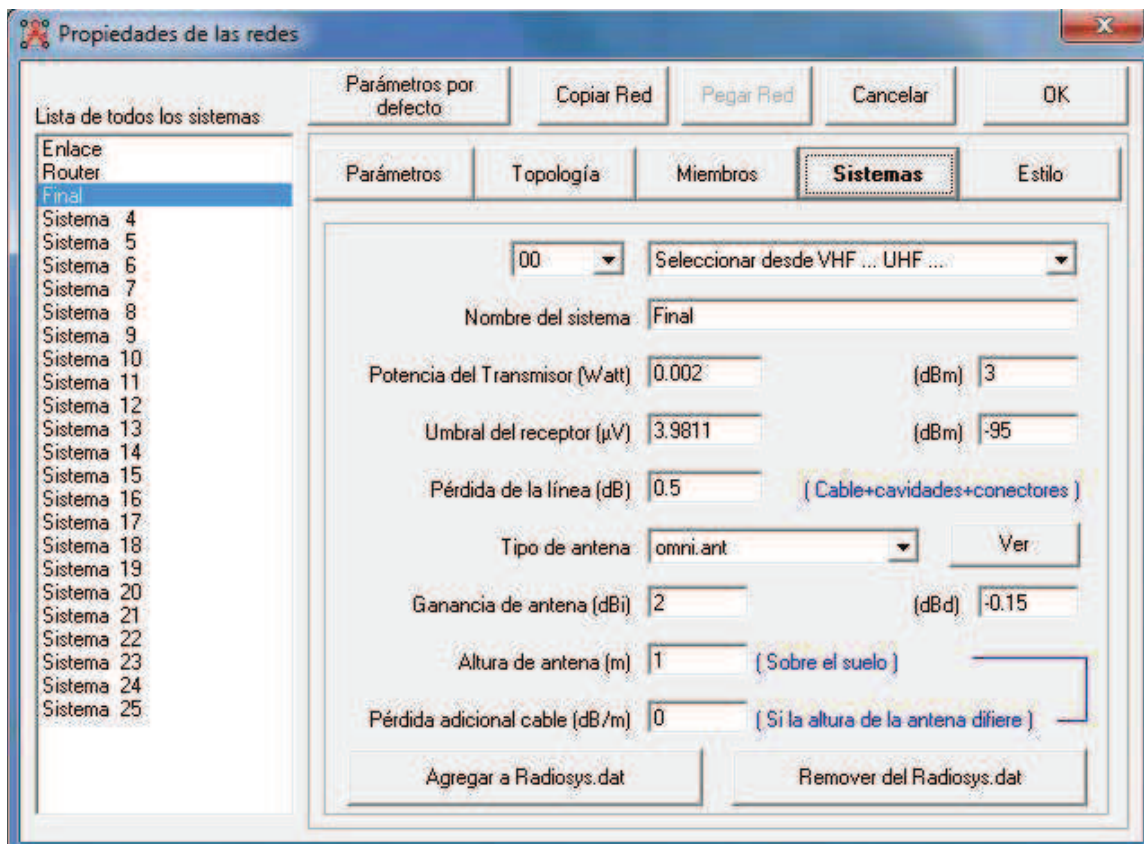


Figura 3.17: Configuración parámetros de las antenas

Una vez posicionados todos los nodos podemos apreciar en la figura 3.18 el estado final de los mismos.

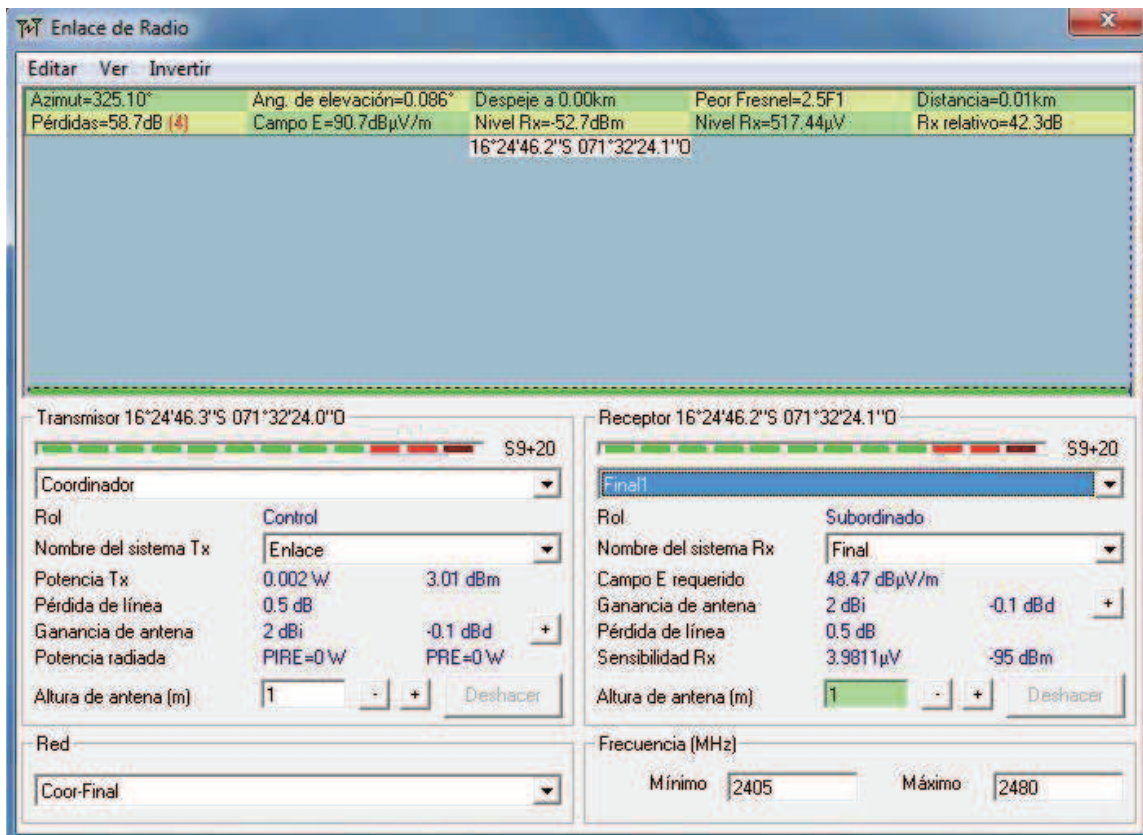


Figura 3.19: Resultados de Enlace de Radio

Además podemos obtener la simulación de la zona de Fresnel del enlace.

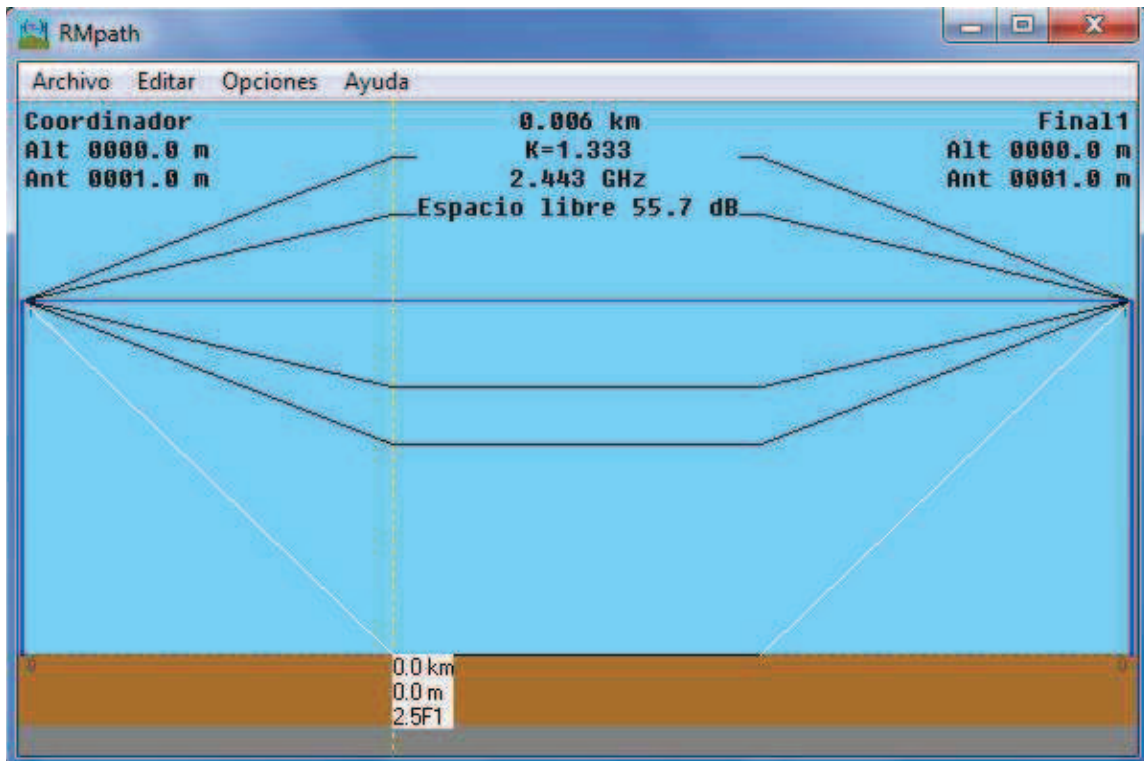


Figura 3.20: Simulación de Zona de Fresnel

Al realizar el estudio de cobertura, la aplicación nos facilita diversas opciones, entre las cuales se encuentra la posibilidad de adaptar un mapa real de la zona para poder observar de manera más intuitiva la cobertura exacta de la antena. En la figura 3.21 se puede comprobar la cobertura del nodo Coordinador, la zona pintada en amarillo tiene la cobertura necesaria para recibir la señal tanto del nodo Router como del nodo Final ya que ambas están dentro de la misma zona.

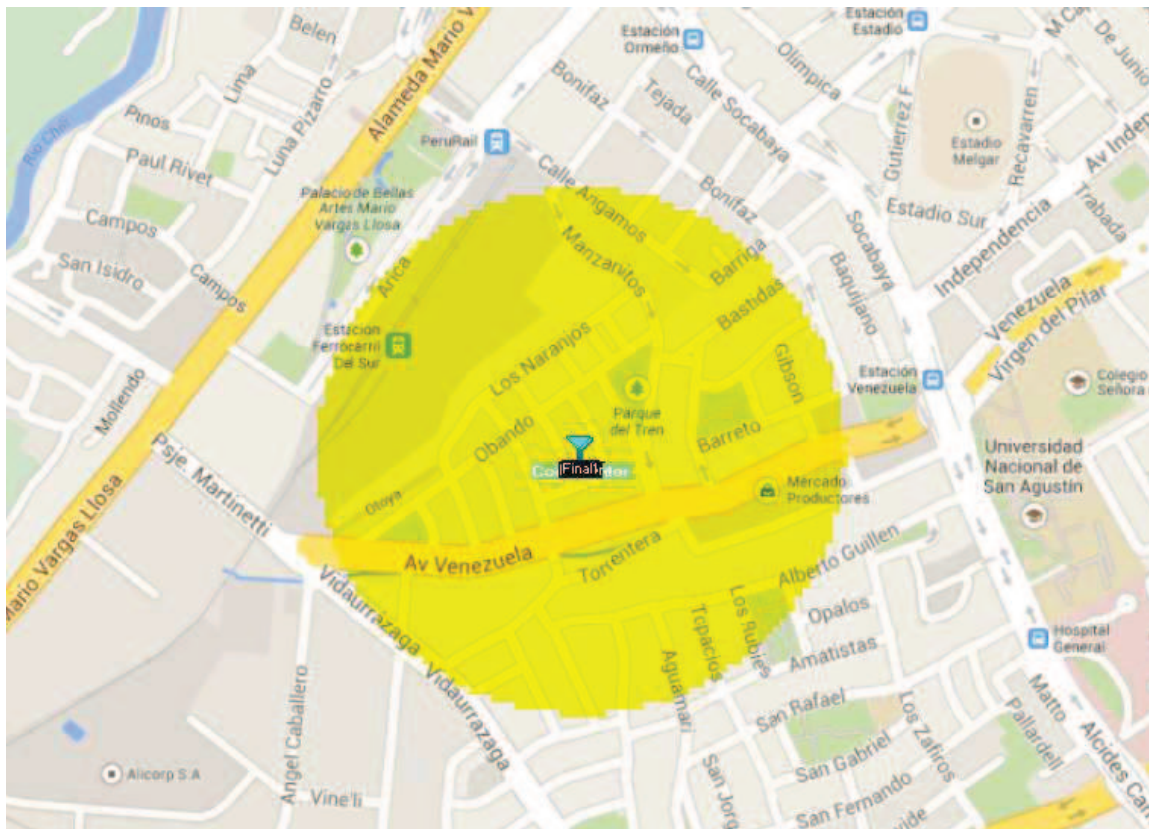


Figura 3.21: Cobertura de los nodos

Luego de haber logrado la simulación con esta aplicación podemos determinar que la ubicación de los nodos cumple con los requisitos del proyecto, ya que además de colocar los nodos finales de manera distribuida se logra abarcar en su gran mayoría todos los puntos del prototipo del terreno. Tenemos también la posibilidad de reubicar de manera manual los distintos caminos en casos de hipotéticas caídas o deterioro del equipo ya que la cobertura de todos los nodos cubre algún otro nodo por donde enviar su información.

3.6 TOPOLOGÍA DE RED LÓGICA

3.6.1 Direccionamiento PAN

El nodo Coordinador será el encargado de inicializar la red, para toda nuestra red deberemos configurar un único PAN ID, de lo contrario ésta no se iniciará.

Por otra parte, utilizaremos los números de Serie SH (Serial High) y el SL (Serial Low) para configurar el DL (Destination Low) y el DH (Destination High) del nodo anterior, esta configuración se verá en siguiente capítulo.

3.6.2 Descubrimiento de direccionamiento de Red

a) Descubrimiento de Ruta

El protocolo ZigBee utiliza mesh routing o enrutamiento en mallado, para generar una ruta entre un dispositivo de origen y uno de destino. El mesh routing hace que los paquetes de datos puedan atravesar múltiples nodos en una red. El nodo router y coordinador pueden intervenir en el proceso de generar rutas entre origen y destino por medio del procedimiento llamado “descubrimiento de ruta” (Route Discovery) que se basa en el protocolo AODV (Ad-hoc On-demand Distance Vector Routing).

El enrutamiento bajo el protocolo AODV utiliza tablas en cada nodo, las mismas almacenan el siguiente salto (nodo intermedio entre origen y destino) hacia el destino. Si este proceso se desconoce, el descubrimiento de ruta debe iniciarse para encontrar un camino.

Cuando un nodo origen descubre una ruta hacia el destino, genera una solicitud de broadcast. Esta solicitud de ruta contiene la dirección de origen, la dirección de destino y un campo de costo de camino (Path Cost – sirve para medir la calidad de la red). La solicitud de broadcast es reenviada por los nodos y estos actualizarán el campo de costo a la vez que crean entradas temporales en su tabla de descubrimiento de ruta.

| Nodo | Siguiente Salto (Next Hop) |
|------------------|-------------------------------|
| Router o Final 1 | Coordinador |
| Router o Final 2 | Coordinador |

Tabla 3.2: Salto de nodos

Una vez que el nodo destino recibe una solicitud de ruta, compara el costo de camino con la solicitud de ruta recibido anteriormente, si éste es mejor que cualquier otro almacenado de manera previa, el nodo destino transmitirá un paquete de respuesta de ruta al nodo que originó la solicitud de ruta.

A continuación se muestra en la figura 3.22 la dirección de los datos recolectados desde los nodos Finales o nodos Router, y estos a su vez hacia el Coordinador.

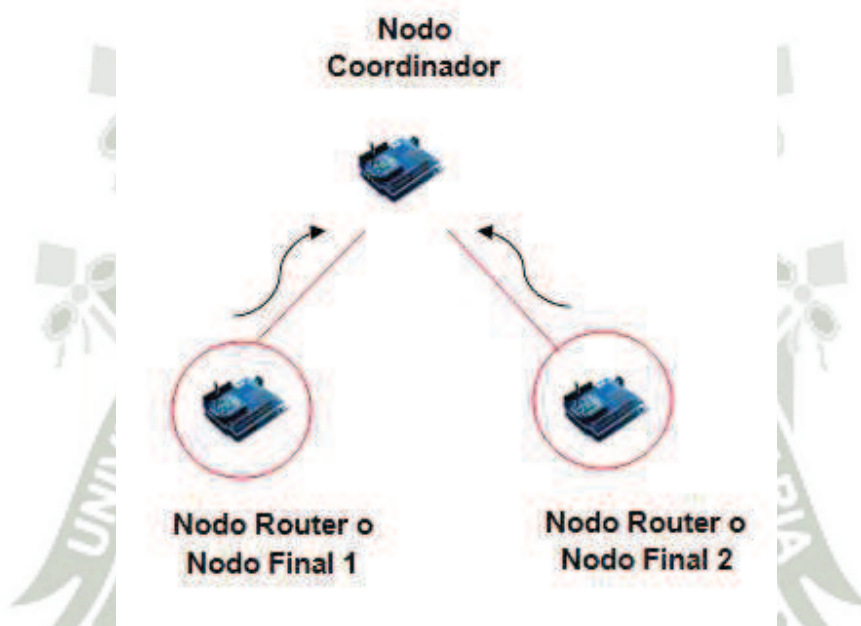


Figura 3.22: Dirección de datos en la Red

3.7 SENSORES

Un sensor es un dispositivo que detecta fenómenos físicos o químicos, llamadas variables de instrumentación, como la temperatura, la intensidad luminosa, la distancia, la aceleración, la presión, la fuerza, la torsión, la humedad, el Ph, etc. y convierte estos fenómenos físicos o químicos en un cambio de alguna

de las siguientes variables, por ejemplo: resistencia eléctrica, tensión eléctrica y corriente eléctrica. Esto permite que luego pueda ser procesado por una PC o un microcontrolador y ser transmitido.

Podemos clasificar a los sensores en dos categorías según el modo de transferencia de información al procesador.

- Sensores Digitales: Tienen una salida Digital.
- Sensores Analógicos: Tiene una salida Analógica.

Otro tipo de clasificación es según la clase de energía que reciben para luego convertirla en otro tipo de energía (voltaje o corriente).

a) Sensores Térmicos

- Sensores de Temperatura: termómetros y termostatos.

b) Sensores Mecánicos

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

c) Sensores Ópticos

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

d) Sensores Acústicos

- Sensores de sonido: micrófonos

e) Sensores Resistivos

- Aplican un principio de conductividad de la tierra. Es decir, cuanto más cantidad de agua hay en la muestra, más alta es la conductividad de la tierra.

f) Sensores Capacitivos

- Se basan sencillamente en el cambio de la capacidad que sufre un condensador en presencia de humedad.

En la presente investigación se busca desarrollar un sistema capaz de monitorear la temperatura y humedad relativa del ambiente y humedad del terreno agrícola. Para el diseño se usa sensores capacitivos, térmicos y sensores resistivos. Los cuales cuentan con salidas digitales y facilitarán la adquisición de datos ya que los módulos Arduino contienen entradas digitales.

3.7.1 Sensor de Humedad y Temperatura Relativa

Sensor de humedad y temperatura de muy bajo costo. La salida suministrada es de tipo digital y analógica. El sensor de humedad es de tipo capacitivo, mientras que la medición de temperatura se efectúa mediante un termistor. En el ANEXO III, se muestran sus especificaciones técnicas.



Figura 3.23: Sensor de Humedad y Temperatura Relativa

3.7.2 Sensor de Humedad de Suelo

Este sensor tiene la capacidad de medir la humedad del suelo. Aplicando una pequeña tensión entre los terminales del módulo YL-69 hace pasar una corriente que depende básicamente de la resistencia que se genera en el suelo y

esta depende mucho de la humedad. Por lo tanto al aumentar la humedad la corriente crece y al bajar la corriente disminuye.

Consiste en una sonda YL-69 con dos terminales separados adecuadamente y un módulo YL-38 que contiene un CI comparador LM393 SMD (de soldado superficial) muy estable, un led de encendido y otro de activación de salida digital.

Este último presenta 2 pines de conexión hacia el módulo YL-69, 2 pines para la alimentación y 2 pines de datos. En el ANEXO III, se muestran sus especificaciones técnicas.

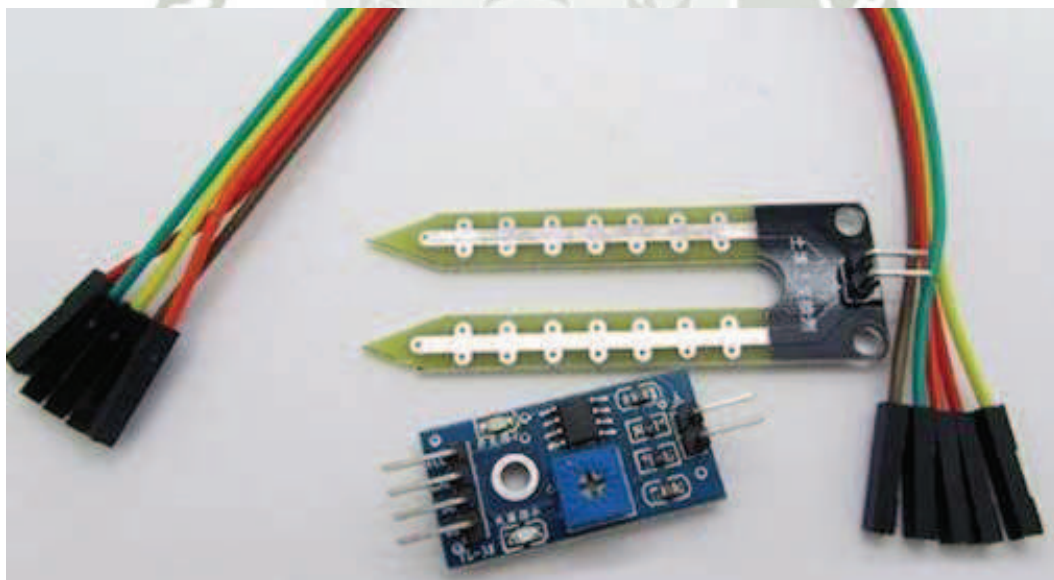


Figura 3.24: Sensor de Humedad del suelo

3.8 CHASIS PARA LOS DISPOSITIVOS

Los dispositivos XBee S2, Arduino UNO y Shield XBee se colocarán en chasis que cumplan con los siguientes requerimientos:

- Aislante y térmico ya que los dispositivos estarán en la intemperie.
- Se usará material especial que no atenué la intensidad de la señal.
- Cumplan con las siguientes medidas: 6.2 cm (ancho) x 11.2 cm (largo) x 3.5 cm (alto).



Figura 3.25: Chasis para Dispositivos

Se utilizará tubo corrugado de PVC para proteger cualquier tipo de cable de conexión que sean utilizados en la red de sensores.



Figura 3.26: Tubo Corrugado

3.9 ENERGÍA PARA EL SISTEMA

La energía en nuestro proyecto se va a proporcionar en su gran mayoría haciendo uso de Energía Renovable, específicamente Celdas o Paneles Solares.

Se va a realizar un pequeño análisis del consumo de corriente y dotación de voltaje por parte de los nodos, para poder elegir el tipo de Panel adecuado para nuestro proyecto.

El consumo por parte de los sensores se va a obviar, debido a que el consumo de los mismos es mínimo ya que estamos hablando de valores bajos de corriente. Debemos tener en consideración el tiempo que vamos a necesitar que el Arduino UNO y el módulo XBee S2 estén activos en el caso de los nodos finales para tomar lecturas de los sensores, en el caso de nodos routers y coordinador siempre tendrán que estar activos lo que hace que el uso de paneles solares sea realmente necesario para estos sistemas.

Tanto el Arduino Uno como el módulo XBee tienen un consumo individual de aproximadamente 40mA activos, lo que suman un consumo por nodo de 80mA.

Para hacer un cálculo de cuanta potencia necesita el Arduino UNO utilizaremos como referencia el pin de 5V, que viene a ser un voltaje regulado, por lo que el consumo durante el tiempo de actividad es de:

$$P = 0.08A \times 5V = 0.4 \text{ Watts}$$

Si vamos a necesitar tomar mediciones cada cierto tiempo (por ejemplo cada 10 minutos), quiere decir que si la lectura del sensor nos toma 10 ms, la circuitería solo estará activa durante 1 segundo (sumando el tiempo de encendido del boot-up (tiempo de encendido o arranque del sistema)) por lo que la media de consumo es de:

$$1 \text{ s} / 600 \text{ s} \times 0.4 \text{ W} = 0.00066 \text{ W} \text{ o } 0.666 \text{ mW}$$

El convertidor de potencia proporciona los 5 V necesarios para el Arduino UNO, aunque la potencia necesaria para activar de nuevo la placa hará que solo un 85% sea eficiente. Lo que hace que el consumo del Arduino UNO sea realmente de:

$$666/0.85= 0.783 \text{ mW}$$

Si usamos una batería recargable de 9V (Alcalina) tendremos 2.25 Wh (considerando que la batería proporciona 250 mAh), por lo tanto:

$$2250 \text{ mWh} / 0.783\text{mW} = 2873.56 \text{ horas de vida}$$

Aproximadamente 3 a 4 meses de vida (algo menos dependiendo del número de sensores a leer).

Para el caso del nodo router y coordinador la duración cambia debido a que estos siempre estarán activos por su naturaleza en el protocolo ZigBee. Por ello tenemos un consumo de:

$$2250 \text{ mWh} / 400 \text{ mW} = 5.625 \text{ horas de vida}$$

Por lo que el uso de paneles solares es imprescindible tanto para el nodo final y nodo router, en el caso del nodo Coordinador podrá alimentarse de la PC o estación base.

Según al análisis anterior se va utilizar un Panel Solar de dimensiones 7 x 4.5 Pulgadas, con Potencia de 2.5 W, Voltaje de 8V y Corriente de 310 mA, para asegurar y dotar de energía necesaria para cada elemento o nodo.

Cabe mencionar que para trabajar con Paneles Solares, hay que tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Suficiente espacio para su instalación: si no se dispone con espacio, ni un area libre para colocar un panel solar entonces es inútil pensar en aprovechar la energía solar mediante paneles fotovoltaicos. El área a requerirse depende del tipo de Panel que se elija.
- Suficientes rayos solares: con un clima soleado la mayor parte del tiempo, los paneles estarán expuestos a luz solar directa la mayor parte del día, lo cual es un gran beneficio para generar energía suficiente para su uso. Tenemos la gran ventaja de estar en una región optima zona desértica y tropical, para este tipo de energía
- Hay que considerar el costo de cada uno ellos: los costos de un sistema de panel solar están mayormente en función a los costos de las células solares, sin embargo cada vez estos costos van siendo más competitivos y de menor monto.

En el caso de no contar con Energía Solar se usará un banco de baterías las cuales se cargaran con la propia energía solar para luego suministrar energía a

Capítulo III: Diseño de la Red Inalámbrica de Sensores

nuestros nodos, el diseño e implementación del mismo no está comprendido en nuestro proyecto, pero se podrá realizar como una mejora del mismo.

Podemos apreciar en la figura 3.27 el modelo de las baterías recargables a usar, así como el Panel Solar para nuestros nodos.

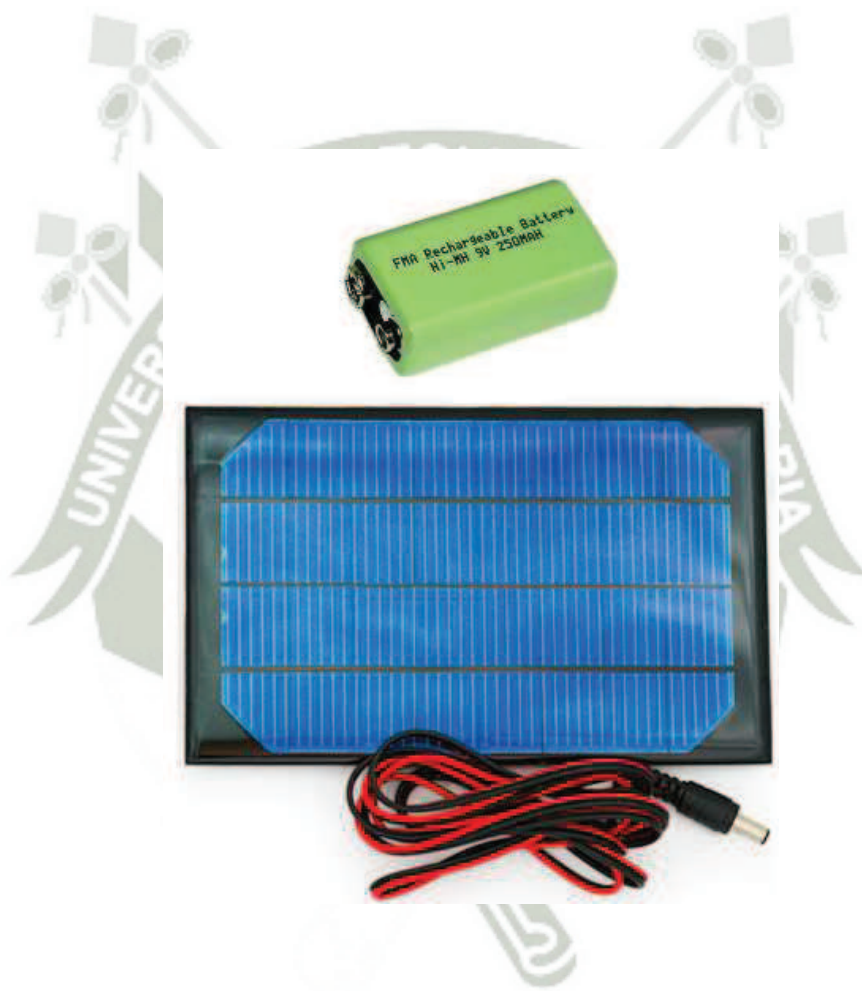


Figura 3.27: Bateria recargable y Panel Solar

CAPÍTULO IV



IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS DE LA RED

A continuación se van explicar los pasos necesarios para poder llevar a cabo las pruebas en los módulos inalámbricos XBee S2 y sus correspondientes resultados.

4.1 INICIO DE LA RED INALÁMBRICA

Para comenzar una red ZigBee, primeramente el nodo Coordinador deberá seleccionar un Canal y un PAN ID para operar que no esté siendo usado por ningún otro Coordinador. Para realizar esto, el Coordinador hará un escaneo de energía de todos los canales especificados por el parámetro SC (Scan Channels). Este tiempo de escaneo está determinado por el parámetro SD (Scan Duration). Una vez finalizado este escaneo, el Coordinador envía una solicitud beacon a cada uno de los canales SC y escucha por cualquier beacon. La información recogida por el escaneo de energía y el escaneo de beacon será usada para determinar y elegir un Canal y un PAN ID.

Una vez realizado este procedimiento el Coordinador permitirá unirse a otros nodos durante un tiempo determinado en su parámetro NJ (Node Join Time).

Antes de que un nodo Router pueda participar en la red, éste debe localizar un Coordinador o algún otro Router que haya entrado en una PAN para intentar participar. En cuanto a los Nodos finales con los respectivos sensores el procedimiento será similar al Router.

Cabe mencionar que los Nodos finales ubicados en el prototipo del terreno de cultivo, están al alcance del Coordinador, por lo que no es necesario colocar un router, puesto que están dentro del alcance especificado en hoja de datos, por ello se logrará con satisfacción la comunicación inalámbrica.

En cuanto a la estructura física de los nodos: el nodo en campo utilizará un soporte de aproximadamente 0.40 metros de altura y una caja o chasis con protección contra las inclemencias del tiempo y otros factores. Para la elección de esta caja de protección debemos recordar los parámetros ya establecidos en el capítulo anterior de Diseño que son:

- Material aislante y térmico, ya que los dispositivos estarán en la intemperie.
- Se usará material especial que no atenúe la intensidad de la señal.
- Cumplan con las siguientes dimensiones: 6.2 cm (ancho) x 11.2 cm (largo) x 3.5 cm (alto).

Con estas dimensiones del chasis, nos permitirán instalar los módulos correctamente sin problemas de espacio, con respecto al cableado usaremos tubo corrugado para su protección.

El modelo final deberá ser parecido a la siguiente figura:



Figura 4.1: Instalación Nodo Final

Como se observó en el apartado de topología física, la instalación de los nodos sigue ciertos criterios a tener en cuenta, como nosotros estamos trabajando con un prototipo de un terreno de cultivo, no tenemos que considerar el uso de vehículos dedicados a la Agricultura que puedan dañar los equipos, ya que si fuese un caso real, se tendrá que tener la dirección de recorrido de los mismos para ubicar los dispositivos de tal manera que no haya inconvenientes, además al tratarse la aplicación en la Agricultura de Precisión, tampoco se tiene el problema con respecto de animales en la zona de trabajo que pudieran ocasionar problemas, ya que su crianza es restringida.

Ahora bien en cuanto a la seguridad de los mismos se deben tomar las medidas necesarias para evitar su sustracción o daños por terceros.

4.2 VERIFICACIÓN Y ANÁLISIS DEL RANGO DE ALCANCE DE LOS MÓDULOS XBEE S2

Antes de utilizar los módulos XBee S2 debemos de actualizar el firmware de los mismos. A continuación se detallan los pasos necesarios para actualizar el firmware de los equipos XBee:

1. Debemos insertar el equipo XBee S2 en el módulo Shield XBee luego colocarlos en el Arduino UNO, con sus pines en posición USB. Después conectamos el cable de programación Cable USB Tipo A/B, que permitirá la comunicación entre el XBee y la PC.
2. Luego abrimos el programa X-CTU y ubicamos la pestaña “Modem Configuration” y presionamos “Read” para ver el firmware que posee actualmente el equipo. Luego presionamos “Download new versions” para descargar las últimas versiones. El firmware se mostrará en el icono “Version”.
3. Seguidamente seleccionamos en “Version” el firmware que se desea actualizar.

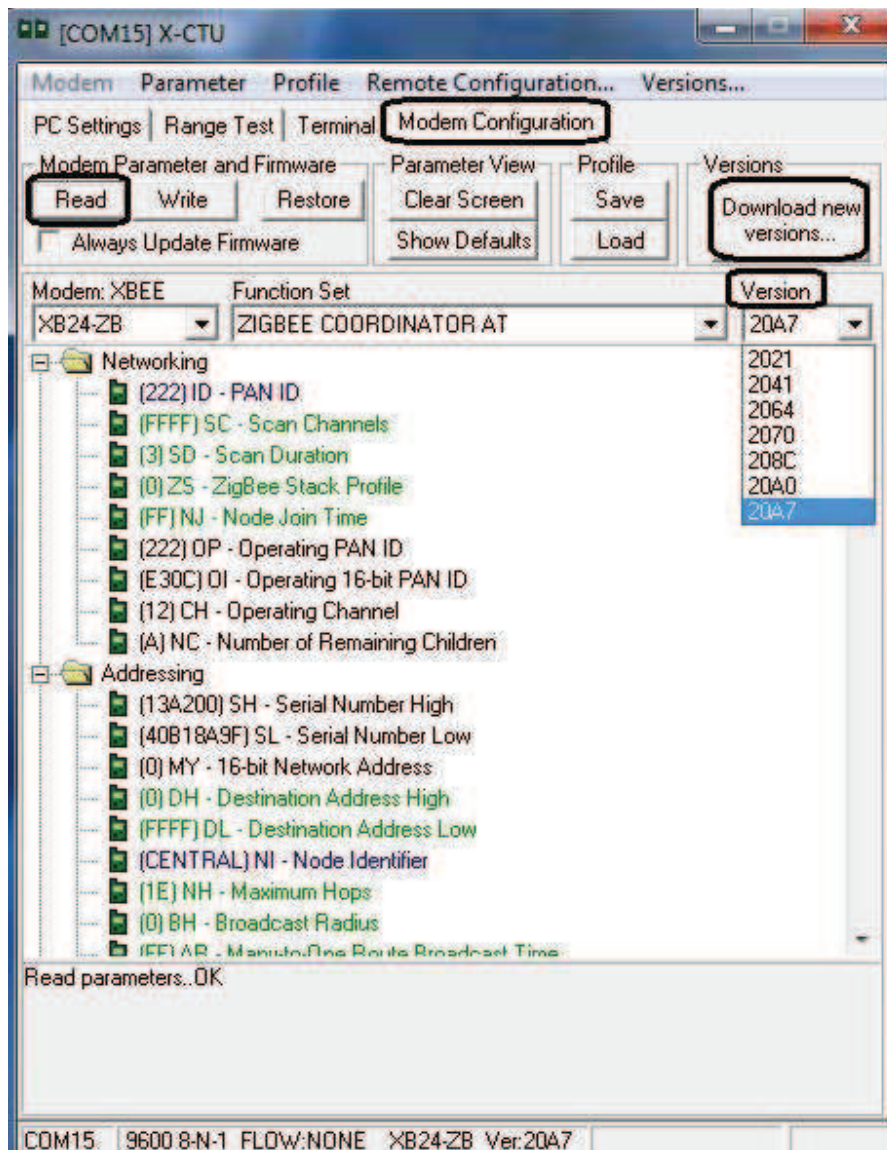


Figura 4.2: Selección firmware

4. Ahora presionamos “Write” para grabar el firmware seleccionado en la memoria.
5. Y por último presionamos “Restore” una vez finalizada la grabación.

Para realizar las pruebas de cobertura se debe ingresar al programa X-CTU y seleccionamos la pestaña “Range Test”. Dentro de ella se debe activar la opción Loop Back la cual permitirá generar automáticamente datos que se enviarán al otro módulo de forma serial, observando la cantidad de datos que llegan a su destino se podrá verificar el porcentaje de eficiencia de la transmisión; adicionalmente a esto, se puede activar la opción de RSSI que permite obtener en dBm el valor de potencia de la señal que se emite.

Para simular la cobertura se debe tomar los panoramas sin línea de vista y con línea de vista, para ambos casos hay que tener en cuenta la necesidad de considerar los elementos que de todas maneras obstaculizarán el proceso de comunicación inalámbrica entre los módulos generando pérdidas en la transmisión, entre ellos por ejemplo el hecho de tener paredes, techos o también materiales van a generar una atenuación de la señal.

Si bien algunos elementos generan atenuación pero no bloquean la señal, otros pueden anular la señal.

Como ejemplo en la tabla 4.1 y 4.2 tenemos algunos elementos que generan atenuación.

| Objeto | Frecuencia de la señal | Atenuación de la señal |
|----------------------------------|------------------------|------------------------|
| Pared de partición de 2 pulgadas | 914 MHz | 1.5 dB |
| Piso de un edificio | 914 MHz | 17 dB |
| Piso de un edificio | 1.2 GHz | 23 dB |
| Pared interior 4 pulgadas | 1.2 GHz | 6 dB |
| Pared interior de ladrillo | 1.2 GHz | 2.5 dB |
| Pared de yeso | 1.2 GHz | 1.5 dB |
| Cristal reforzado | 1.2 GHz | 8 dB |

Tabla 4.1: Atenuación de la señal en varios objetos

| Materia | Grado de atenuación | Ejemplo |
|---------------|---------------------|--------------------------------|
| Madera | Bajo | Puerta, piso |
| Vidrio | Bajo | Ventanas |
| Cuerpo humano | Medio | Grupo grande de personas |
| Ladrillos | Medio | Pared interna, externa, piso |
| Agua | Medio | Madera húmeda, acuario, fuente |
| Cerámica | Alto | Baldosa cerámica, techo, piso |
| Papel | Alto | Rodillo o apilado de papel |
| Hormigón | Alto | Piso, pilares, columnas |
| Plateado | Muy alto | Espejos |
| Metal | Muy alto | Escritorios |

Tabla 4.2: Niveles de atenuación para diferentes materiales

Para nuestra aplicación debemos tener el panorama con línea de vista, pero en el caso que no lo hubiera, nuestros módulos RF podrán trabajar con normalidad.

a) Prueba de comunicación a 5 metros

Realizando la primera prueba se generaron 79 paquetes de 32 bytes de los cuales se perdieron 2 paquetes; lo que nos da como resultado una eficiencia del 97.5 % y una potencia de -67 dBm.



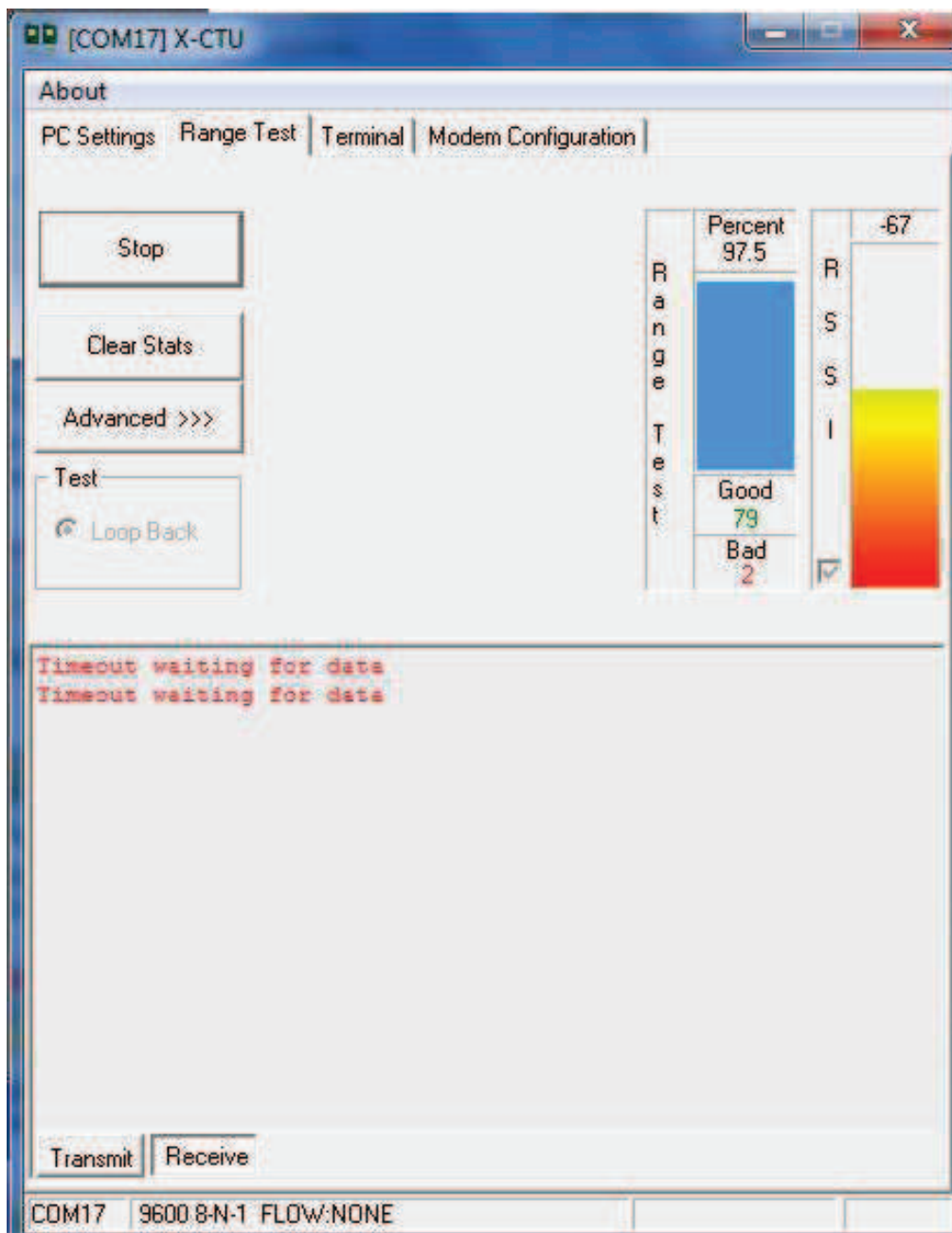


Figura 4.3: Potencia y paquetes enviados a 5 m

b) Prueba de comunicación a 20 metros

Debido al éxito alcanzado en la comunicación a 5 metros se procedió a aumentar la distancia hasta llegar a 20 metros.

Realizando ésta segunda prueba se generaron 62 paquetes de 32 bytes de los cuales no se perdieron paquetes; lo que nos da como resultado una eficiencia del 100% y una potencia de -65 dBm.



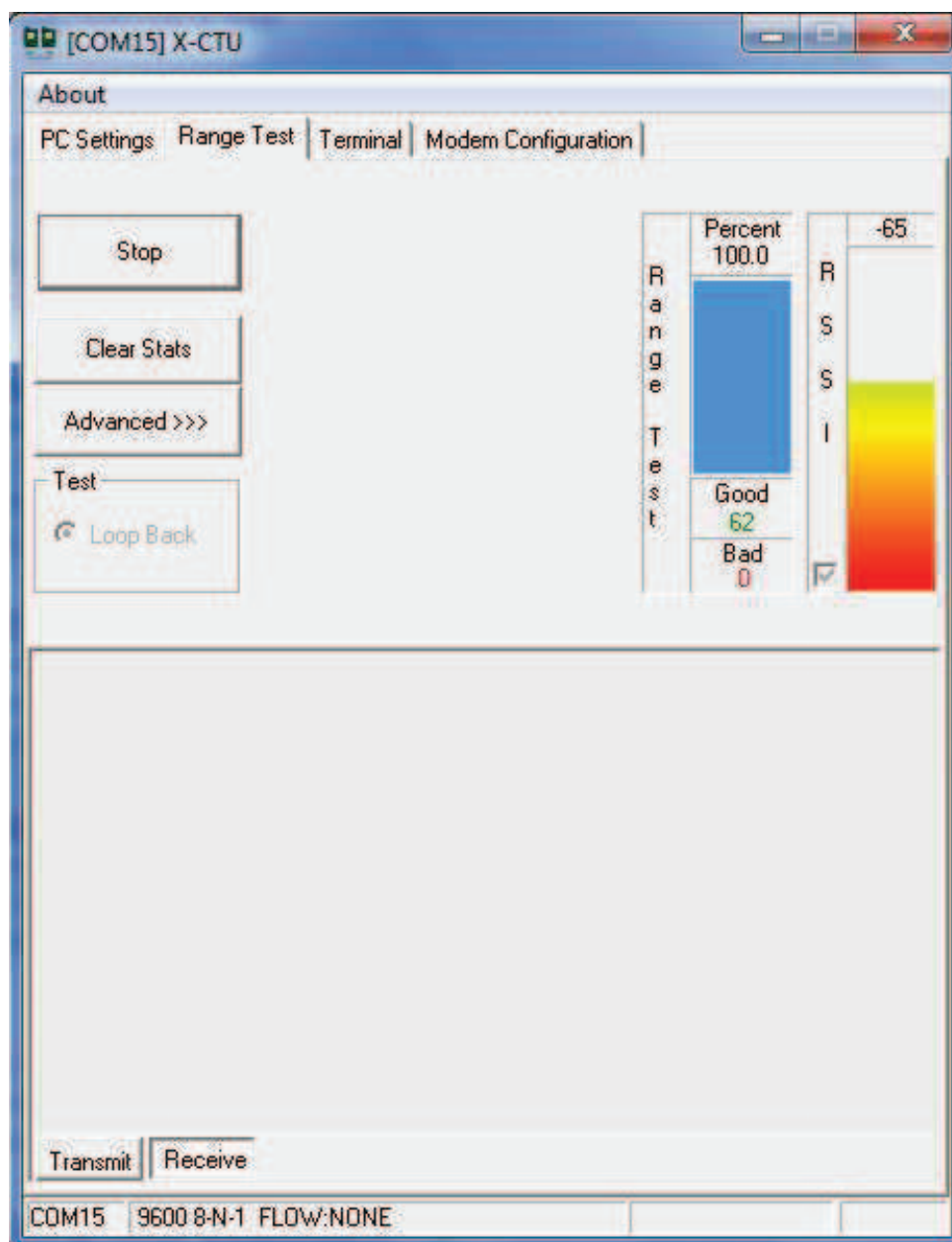


Figura 4.4: Potencia y paquetes enviados a 20 m

c) Prueba de comunicación a 50 metros

Se puede afirmar que la transmisión fue exitosa con una eficiencia de 72.5% puesto que de los 374 paquetes enviados 114 de ellos no llegaron a su destino. La potencia fue de -61dBm.



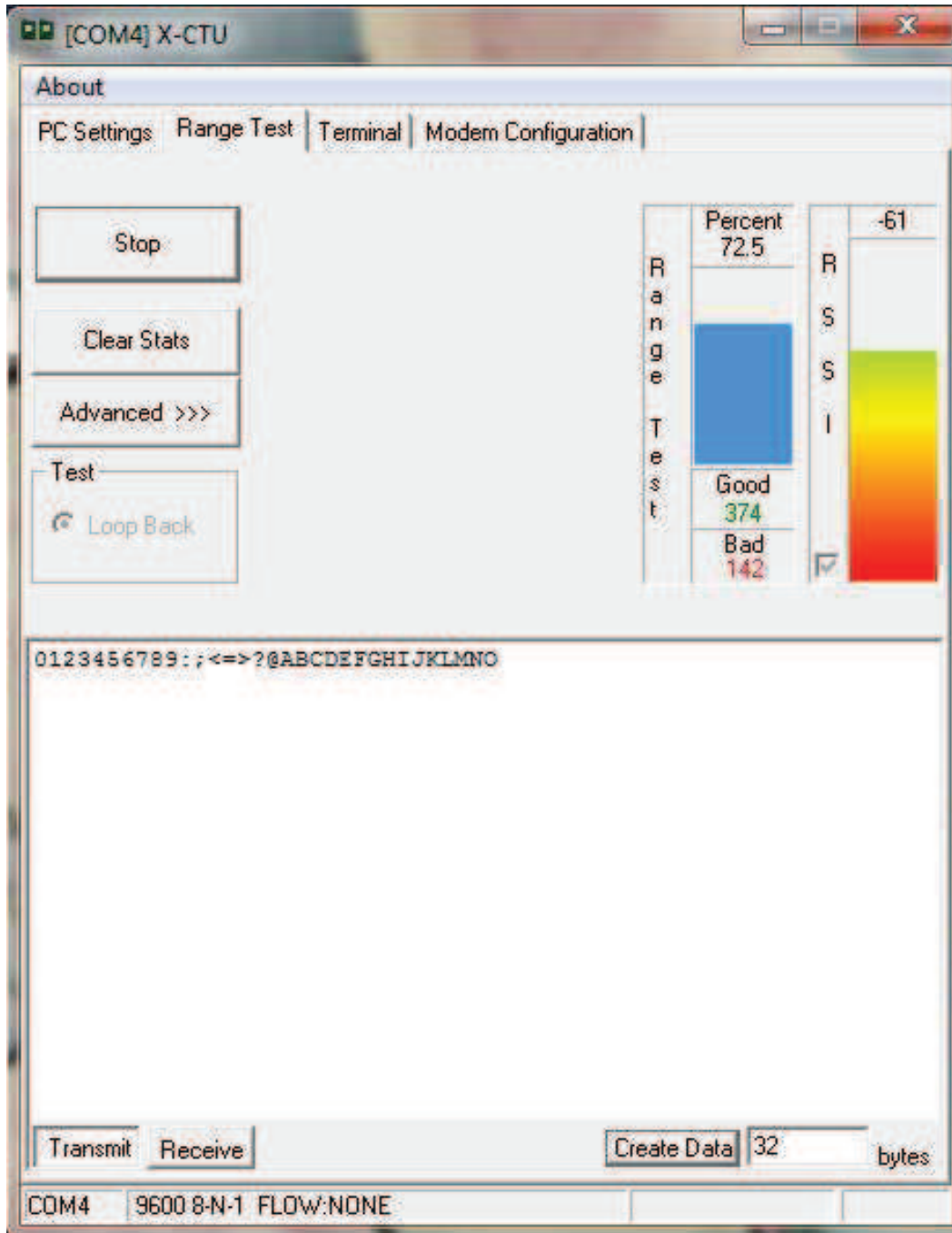


Figura 4.5: Potencia y paquetes enviados a 50 m

d) Prueba de comunicación a 70 metros

La eficiencia de transmisión a 70 metros fue del 99.5 %, de los 393 paquetes enviados solo 2 paquetes fueron erróneos y no llegaron a su destino. La potencia generada fue de -58dBm.



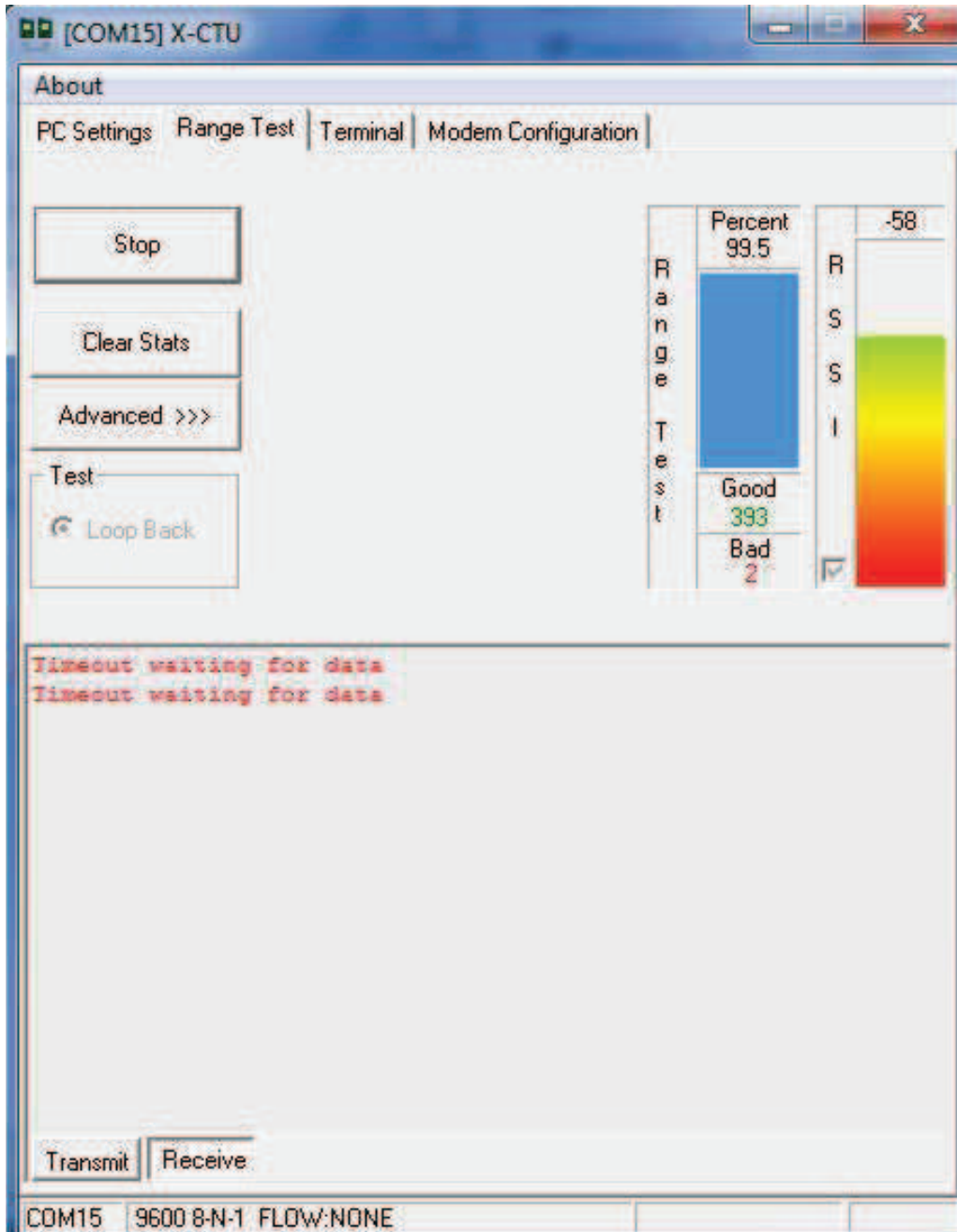


Figura 4.6: Potencia y paquetes enviados a 70 m

En la Tabla 4.3 se puede observar un resumen de los resultados obtenidos una vez realizadas las pruebas de alcance a los módulos XBee S2 con línea de vista.

| Distancia(m) | Eficiencia (%) | RSSI(-dBm) |
|--------------|----------------|------------|
| 5 | 97.5 | -67 |
| 20 | 100 | -65 |
| 50 | 72.5 | -61 |
| 70 | 99.5 | -58 |

Tabla 4.3: Valores de Eficiencia y RSSI con Línea de Vista

Los resultados a distancias mayores de 100 metros fueron menos satisfactorios, la razón es que no se tuvo línea de vista completamente despejada, para alcanzar la máxima distancia citada en las hojas de especificaciones de los módulos no debe existir ningún objeto que obstaculice la transmisión. En todos los casos la pérdida de información es mínima.

Se puede afirmar después de haber observado los resultados de las pruebas de transmisión realizadas, que los módulos XBee S2 son idóneos para implementar una red inalámbrica de sensores, pues las distancias que se tienen en nuestro prototipo de terreno agrícola son menores; además la pérdida de información es casi nula a distancias menores de 100 metros.

Cabe mencionar que esta aplicación está enfocada en terrenos de cultivos de mayor área, hablamos de hectáreas, si fuera ese el caso, los dispositivos inalámbricos también se desempeñarían correctamente, puesto que una hectárea es un cuadrado que mide 100 m por lado, por ello tendrían una aceptable cobertura.

4.3 PRUEBAS CON PROTOTIPO Y RESULTADOS

Se realizaron pruebas tanto para la conexión punto-punto, punto-multipunto y estrella que es la que usaremos en nuestra red. A continuación se mostrará la configuración de los nodos para cada conexión.

4.3.1 Prueba Conexión Punto-Punto

En ésta topología punto a punto se necesitan 2 equipos transmisores. Estos no poseen ninguna jerarquía entre ellos, esta prueba consistirá en enviar datos de un módulo a otro. A continuación se detallan los pasos necesarios para configurar los equipos en éste modo de operación.

1. Insertamos el módulo XBee en el modulo Shield XBee y luego ambos en Arduino UNO. Luego colocamos el cable USB tipo A/B que permitirá la comunicación entre el Arduino Uno y la PC.

2. Presionamos Read para ver la configuración actual de los parámetros del módulo.
3. Presionamos Show defaults para volver a la configuración por defecto.
4. Para una configuración punto-punto los parámetros MY, DH y DL deben ser 0. Otro modo es que el MY de uno sea el DL del otro y viceversa (DH siempre debe ser 0).
5. Por último presionamos Write para grabar los parámetros en la memoria.

Para el segundo módulo XBee se siguen los pasos anteriores.

| Punto-punto | Coordinador 1 | Coordinador 2 | Coordinador 1 | Coordinador 2 |
|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| PAN ID | 250 | 250 | 250 | 250 |
| Channel | E | E | E | E |
| MY | 0 | 0 | 40AF5969 | 40B18A9F |
| DH | 0 | 0 | 0 | 0 |
| DL | 0 | 0 | 40B18A9F | 40AF5969 |

Tabla 4.4: Parámetros configuración punto-punto

Se conecta el cable USB tipo A/B por el módulo que se desea transmitir. De ésta forma se podrá visualizar los datos enviados por un módulo y recibidos por el otro módulo. En la figura 4.7 podemos visualizar la forma de conexión.

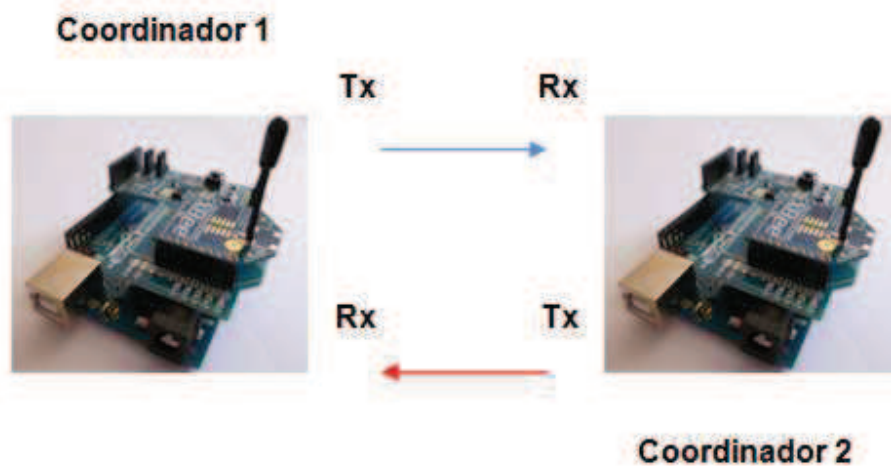


Figura 4.7: Conexión para prueba punto a punto

El programa X-CTU en la opción Terminal se muestran en azul los datos enviados y en rojo los datos recibidos, figura 4.8.

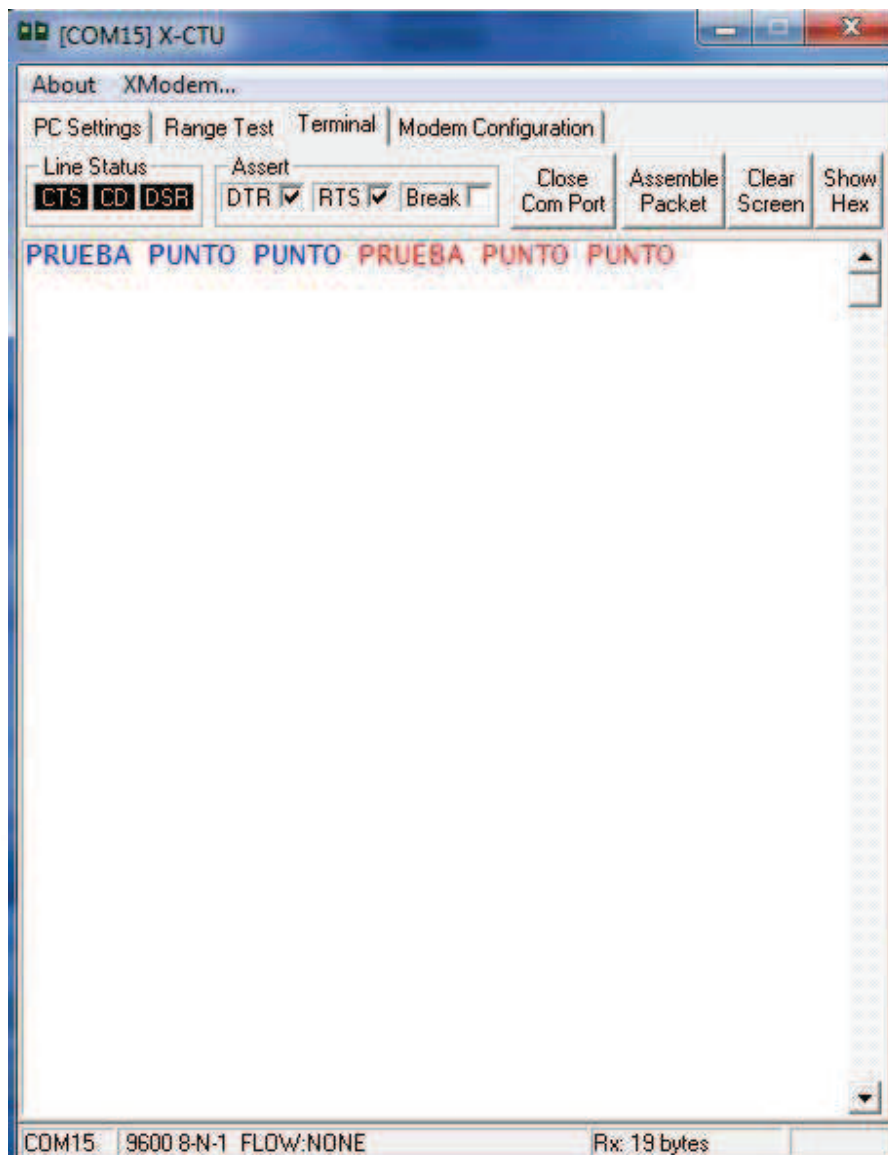


Figura 4.8: Datos recibidos por el Terminal

4.3.2 Prueba conexión Punto-Multipunto

En una topología punto multipunto se necesita un equipo Coordinador y uno o más nodos finales o routers. La prueba va a consistir en enviar datos del Coordinador a los nodos Finales y viceversa.

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

1. Insertamos el módulo XBee en el módulo Shield XBee y luego ambos en el Arduino Uno. Luego colocamos el cable USB tipo A/B que permitirá la comunicación entre el Arduino Uno y la PC.
2. Presionamos Read para ver la configuración actual de los parámetros del módulo.
3. Presionamos Show defaults para volver a la configuración por defecto.

Equipo Coordinador

4. Los parámetros DH y MY deben ser 0 y el DL debe ser 0xFFFF.

Equipos o nodos Finales

5. Los parámetros DH y DL deben ser 0. Cada esclavo debe tener un parámetro MY diferente uno con otro, pero es importante que ninguno sea igual a 0.

| Estrella | Coordinador | Terminal1 | Terminal 2 |
|----------|-------------|-----------|------------|
| PAN ID | 250 | 250 | 250 |
| CHANNEL | E | E | E |
| MY | 0 | 914C | FFFE |
| DH | 0 | 0 | 0 |
| DL | FFFF | 0 | 0 |

Tabla 4.5: Parámetros configuración punto-multipunto

6. Después presionamos Write para grabar los parámetros en la memoria.
7. Por último se conecta el cable USB tipo A/B en el Coordinador para poder visualizar los datos recibidos de todos los elementos ya que el coordinador envía un broadcast a todos los equipos terminales. En la figura 4.9 podemos visualizar la forma de conexión y en la figura 4.10 los datos recibidos.

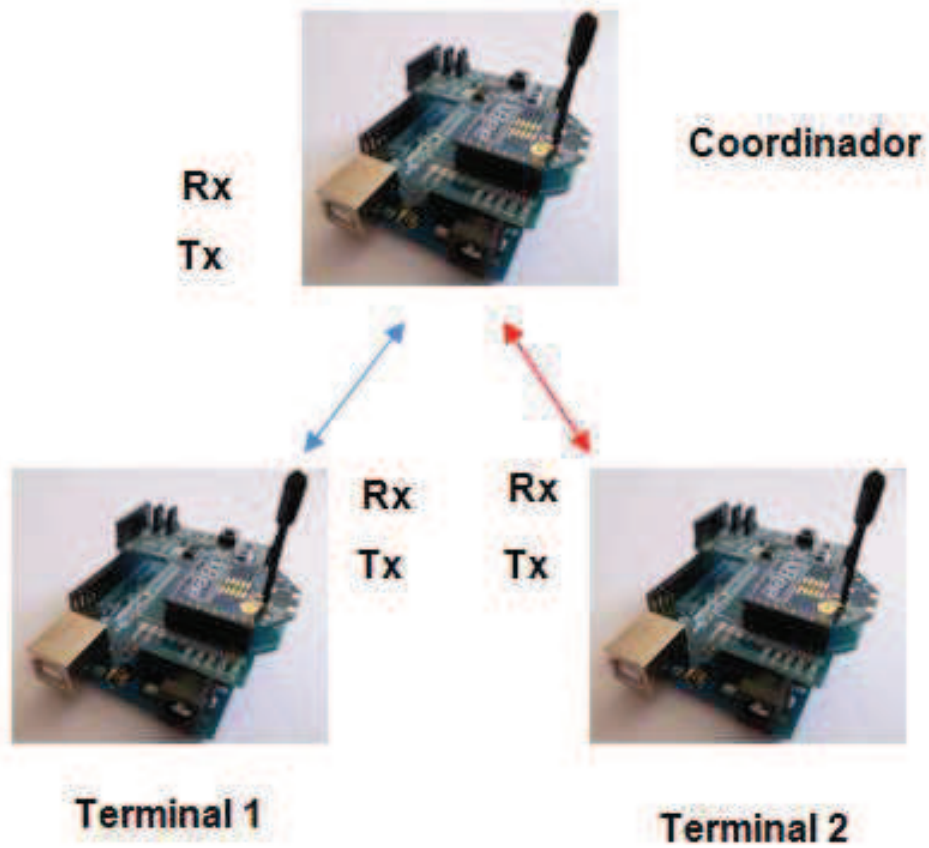


Figura 4.9: Conexión física de para prueba punto multipunto

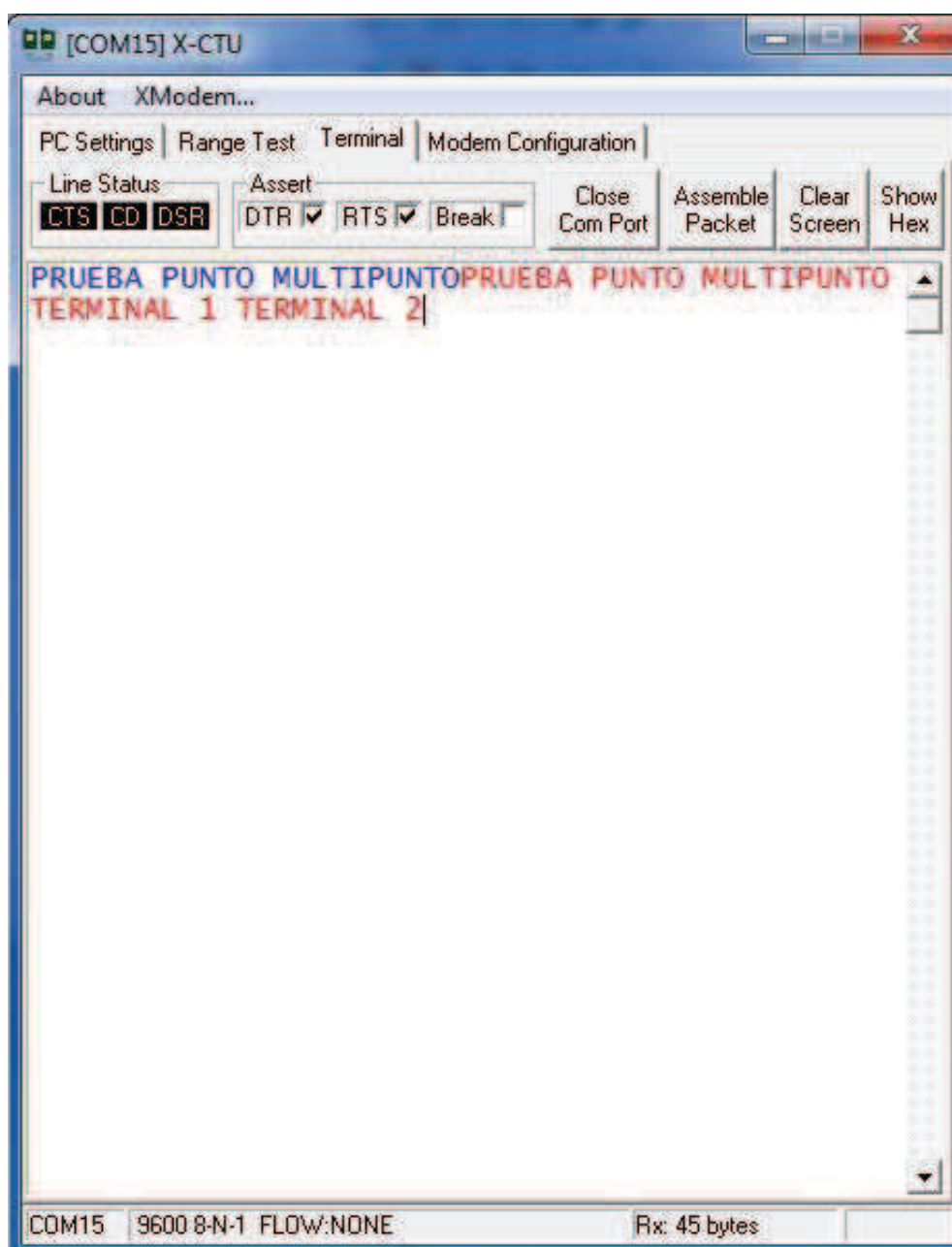


Figura 4.10: Datos recibidos y enviados

4.3.3 Prueba y configuración final en Estrella de los elementos de la WSN

Partimos del siguiente esquema figura 4.11, para realizar las pruebas de prototipo que explica el funcionamiento desde la recolección de información en el nodo final o nodo router hasta el nodo Coordinador o Estación Base (PC) donde se almacenarán los datos.

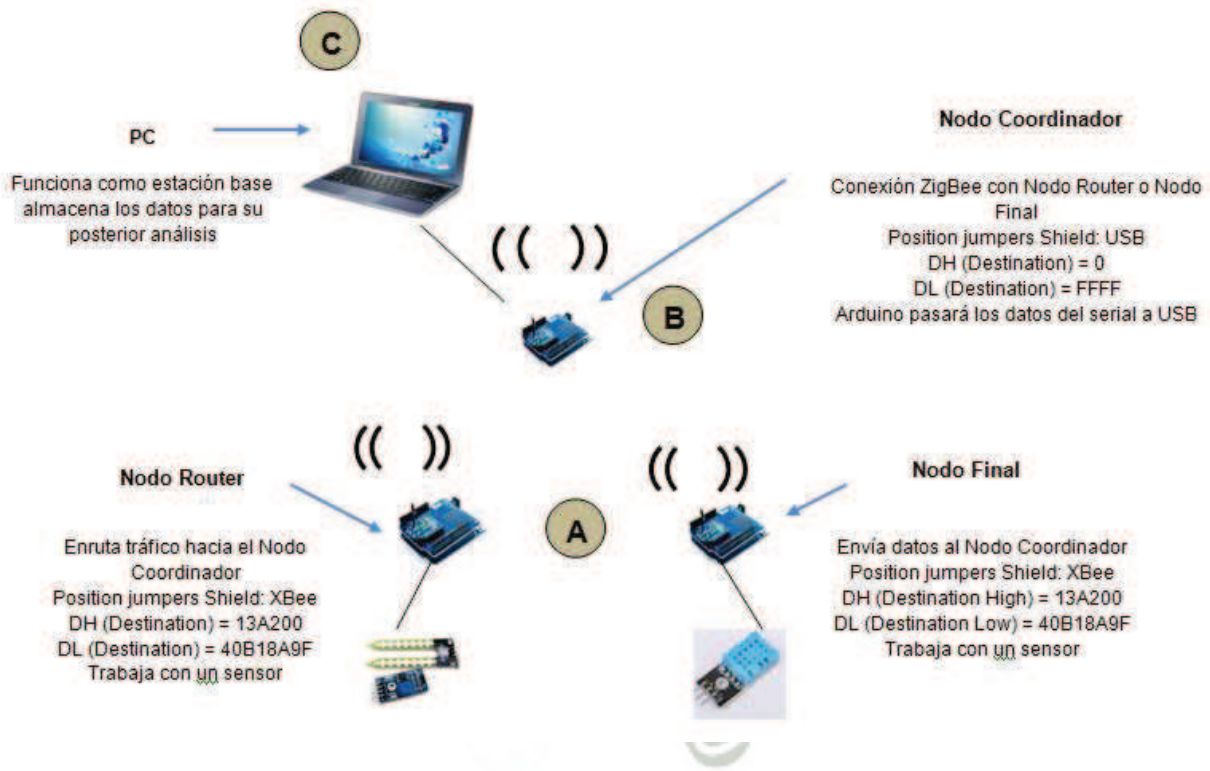


Figura 4.11: Esquema de interconexión elementos WSN

Explicaremos la función de cada elemento de la figura 4.11.

- **En A**, tenemos la recolección de información de los sensores por parte de los Nodos Finales así como de Nodos Router. Serán estos dispositivos los que conecten a los sensores de manera cableada y local. A través del módulo XBee S2 enviarán la información al siguiente módulo, que será el nodo Coordinador. El protocolo entre ambos dispositivos es ZigBee. El direccionamiento para ambos será el número de serie (tanto parte alta como baja del mismo) del siguiente dispositivo, por lo que se configura como DH (Destination High) la parte alta del número de serie del Coordinador (13A200), y como DL (Destination Low) la parte baja del número de serie del Coordinador (40B8A9F).
- **En B**, tenemos el último salto con el protocolo ZigBee, el router o nodo final envía la información recibida al Coordinador de manera transparente. El direccionamiento para este dispositivo, se configura como DH (Destination High) el valor de 0 y como DL (Destination Low) el valor de FFFF la dirección de broadcast. Sin el nodo Coordinador la red no puede inicializarse y no tendría sentido, ya que es éste el encargado de enviar toda la información a la Estación Base.
- **En C**: Tal y como se explicó en la elección de Hardware, el Coordinador dispondrá de un módulo XBee que hablará ZigBee haciendo uso del único puerto UART disponible en la placa Arduino UNO. Dispone de una conexión

USB con la PC por la que pasarán los datos recogidos del Router o Nodo Final, y será el encargado de almacenar dicha información.

4.3.4 Configuración para el inicio de la WSN

Para poder iniciar la red, hacer las pruebas y mostrar los resultados debemos seguir el siguiente procedimiento:

- a) Debemos actualizar el firmware específico de nodos Coordinador, Router o Fina, para ellos se deberá configurar a través del software X-CTU las diferentes versiones de firmware respectivas de cada uno de los dispositivos.
- b) Luego se procederá a configurar el mismo PAN ID en todos los módulos XBee S2 y habrá que prestar especial atención a las direcciones. En el caso del módulo Coordinador habrá que configurar la dirección de broadcast para llegar a todos los nodos (o la dirección del otro extremo si se trata de un punto a punto o punto multipunto).
- c) Como resultado tenemos que la prueba entre nodo Coordinador (Arduino Uno + XBee Shield + XBee S2 con firmware de Coordinador) y nodo Router o Nodo Final (Arduino Uno + XBee Shield + XBee S2 con firmware de Router o firmware de End device) ha resultado exitosa. Tan solo el Coordinador deberá tener la configuración de jumpers en modo USB para poder hacer la lectura de

los datos recibidos por el módulo XBee desde la PC. El resto de módulos tendrán los Jumpers en modo XBee y dejando libre la conexión USB.

| Modulo | Identificación de Nodo | Pan ID | Canal de operación | DH | DL |
|---------------------|------------------------|--------|--------------------|--------|----------|
| Coordinador | Estación Base | 250 | E | 0 | FFFF |
| Router/Final | Router | 250 | E | 13A200 | 40B18A9F |
| Router/Final | Terminal 1 | 250 | E | 13A200 | 40B18A9F |

Tabla 4.6: Parámetros configuración nodos WSN

d) A continuación se puede ver el estado de la configuración en el nodo Coordinador, el nodo Router, y nodo Final.

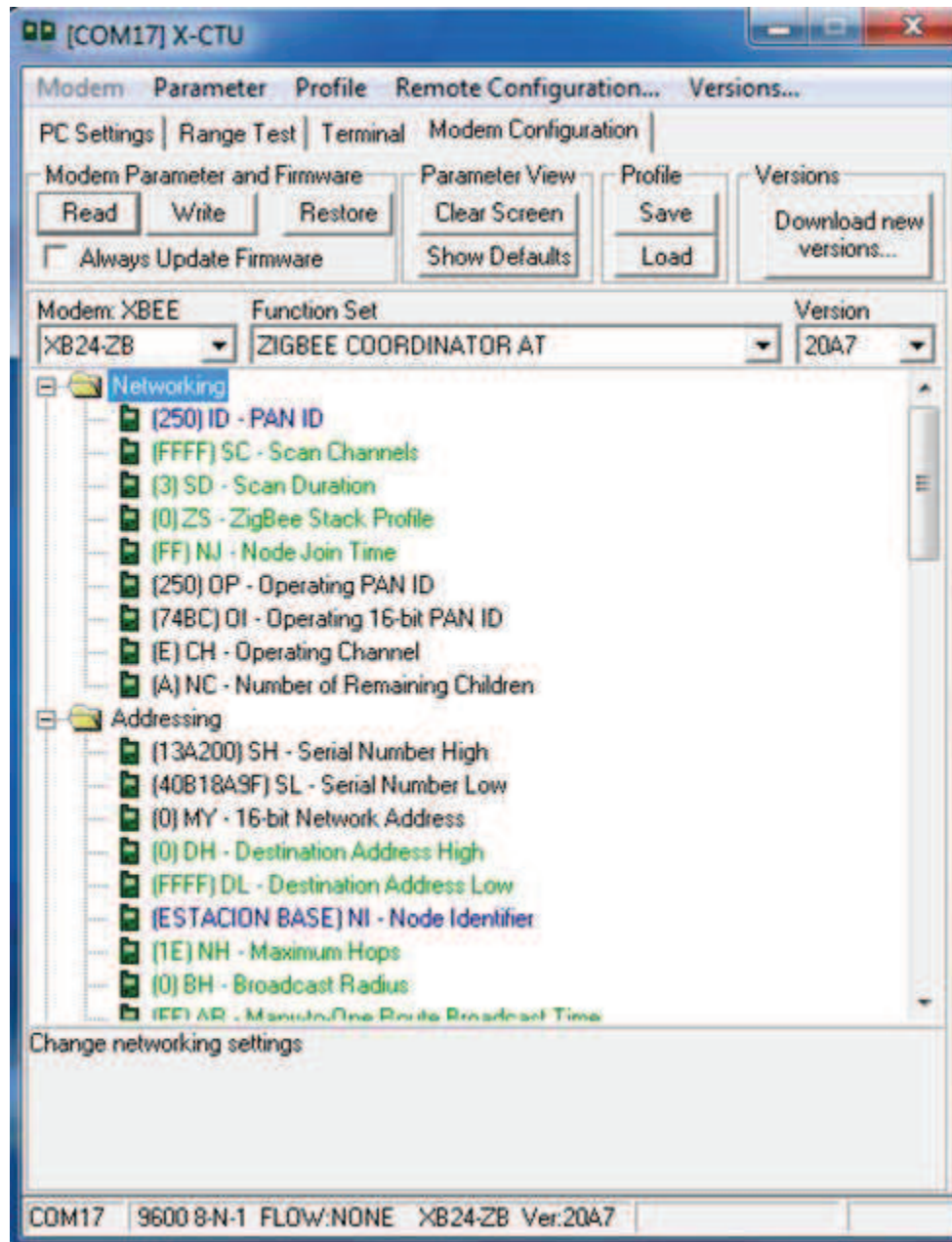


Figura 4.12: Nodo Coordinador X-CTU

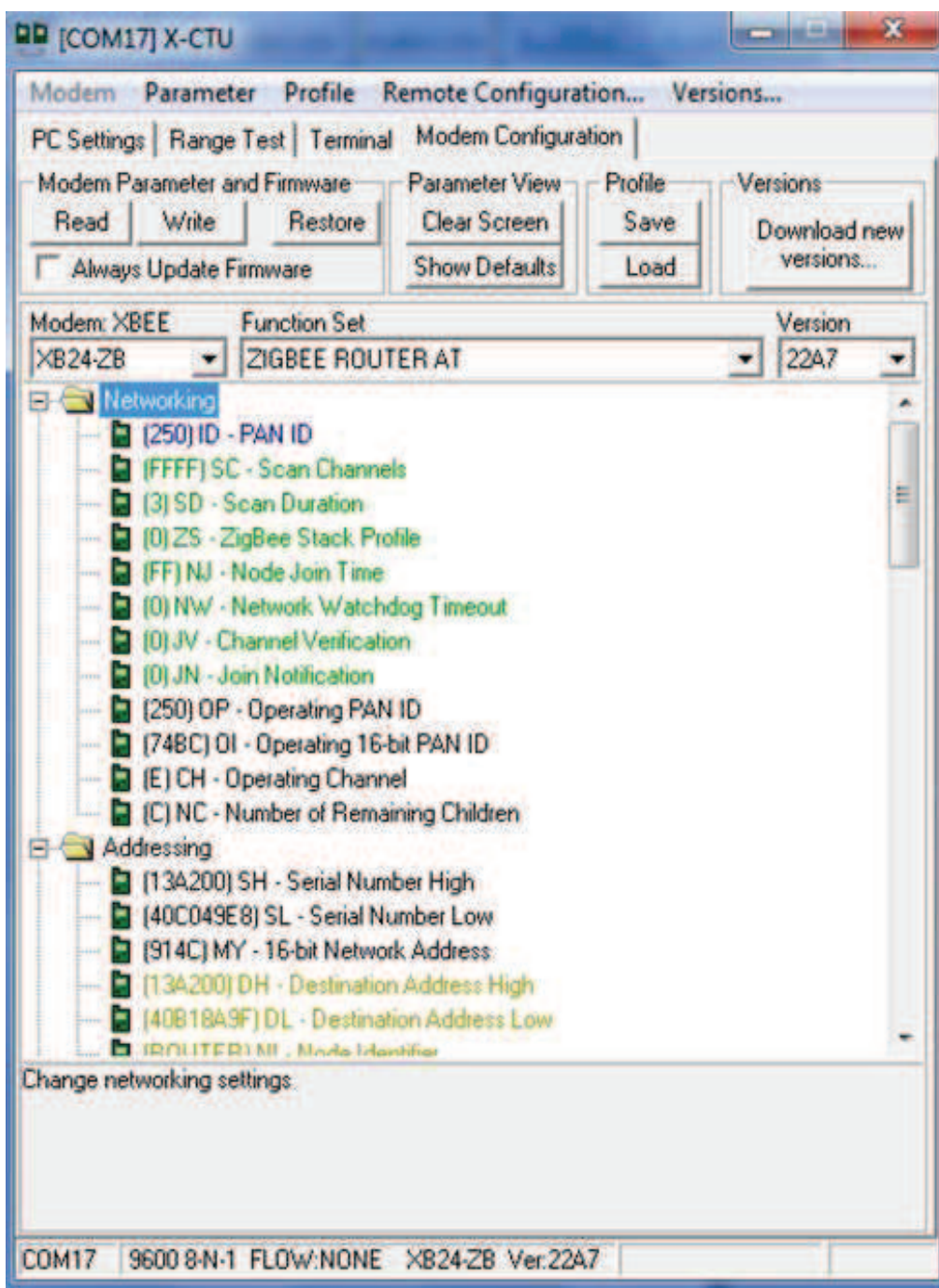


Figura 4.13: Nodo Router X-CTU

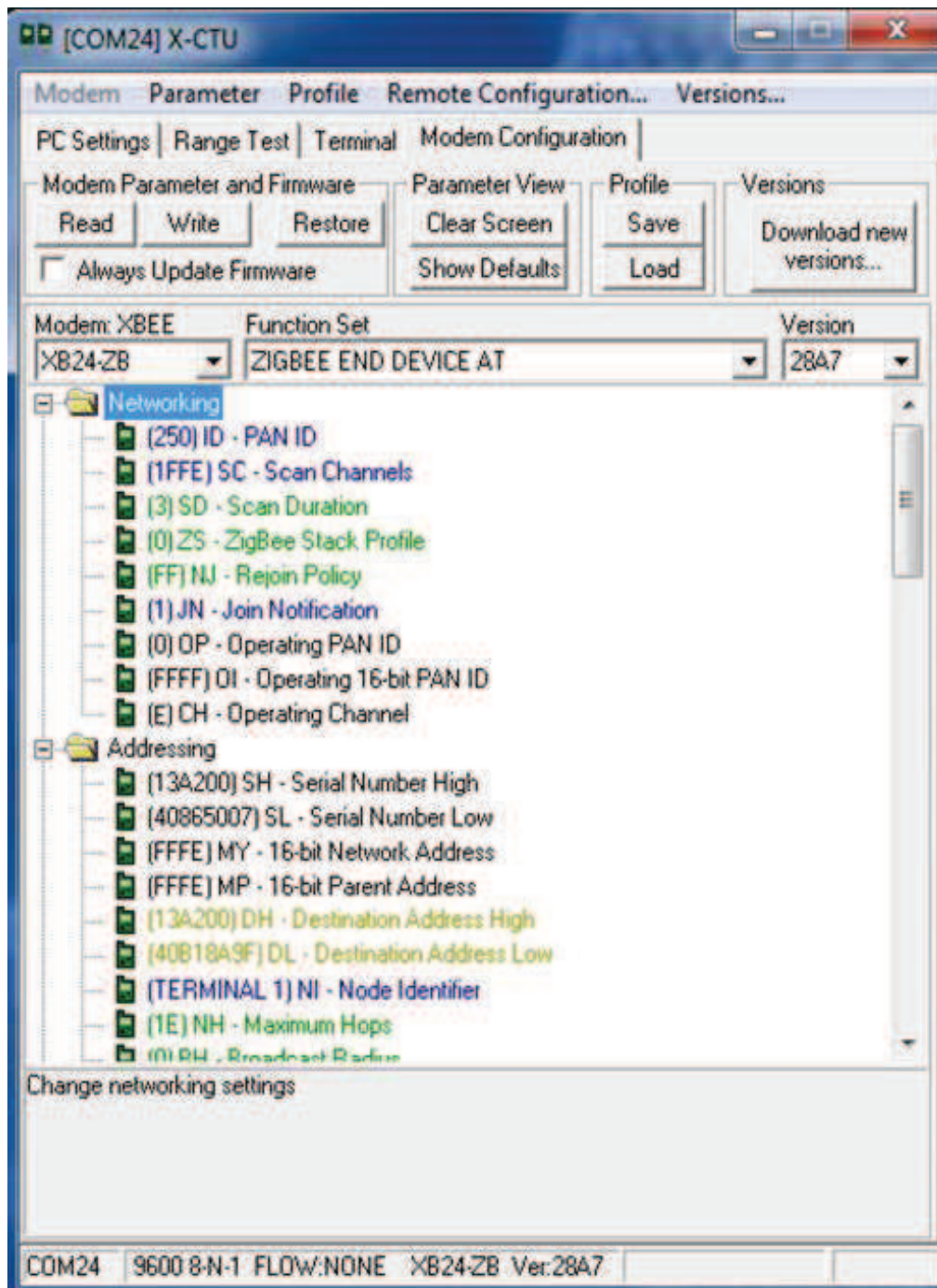


Figura 4.14: Nodo Final X-CTU

4.3.5 Conexión final de elementos en cada nodo

Los módulos tanto para el Nodo final o Nodo Router y Nodo Coordinador están conformados por Arduino UNO + Shield XBee S2 + XBee S2, figura 4.15

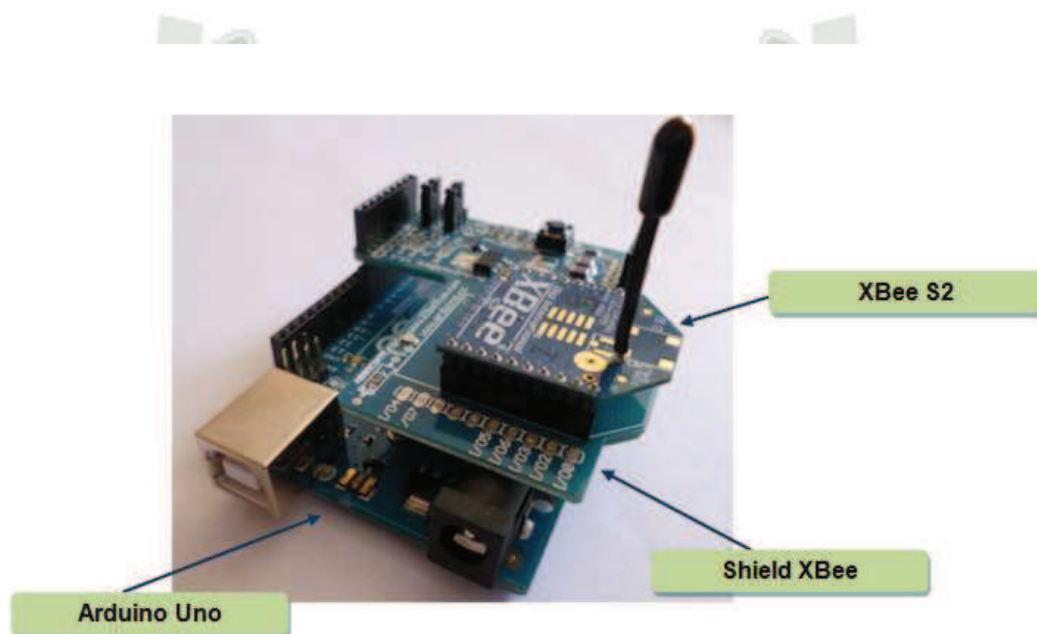


Figura 4.15: Conexionado actual

4.3.6 Resultados Finales de la WSN

Para hacer las pruebas con los sensores en los nodos finales o nodos router, se realizó una prueba de conectividad entre los miembros de la red como se puede apreciar en la figura 4.16 la cual resulto positiva, luego de ello se utilizó

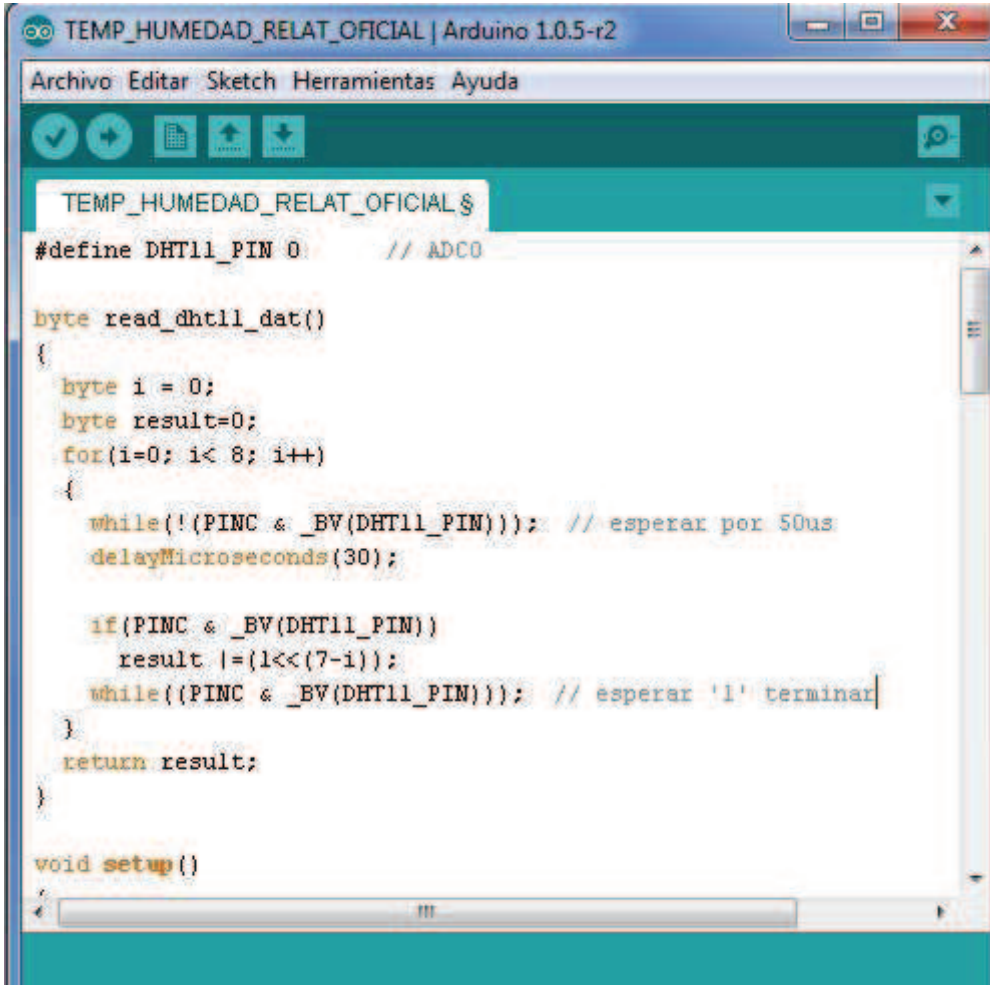
el modulo Arduino UNO para programar en el entorno de desarrollo (también llamado IDE que es el software para realizar la programación en Arduino.), se debe descargar el software de la pagina web de Arduino, <http://arduino.cc/en/Main/Software#toc2>, es de uso libre y gratuito.

El programa que viene a ser una lista de instrucciones recibe el nombre de Sketch, esto en el entorno de Arduino, el sketch o programa escrito en texto pasa por el compilador que lo convierte a un archivo en código máquina que pueda entender el dispositivo de destino. En Arduino el mismo IDE se encarga de llamar al compilador y grabar el archivo compilado en la tarjeta. Para mayor detalle de la programación en Arduino ver Anexo IV.

Para proceder con la prueba se configurará en cada nodo Final o nodo Router el sketch del sensor de Humedad y Temperatura relativa del ambiente con un delay de dos segundos y medio, figura 4.17 y el sketch del sensor de Humedad del suelo con un delay de dos segundos, figura 4.18, el programa completo de ambos se muestra en el Anexo V, cabe indicar que el estado de los delay es variable, se puede modificar según lo requerido.



Figura 4.16: Prueba de conectividad de dispositivos



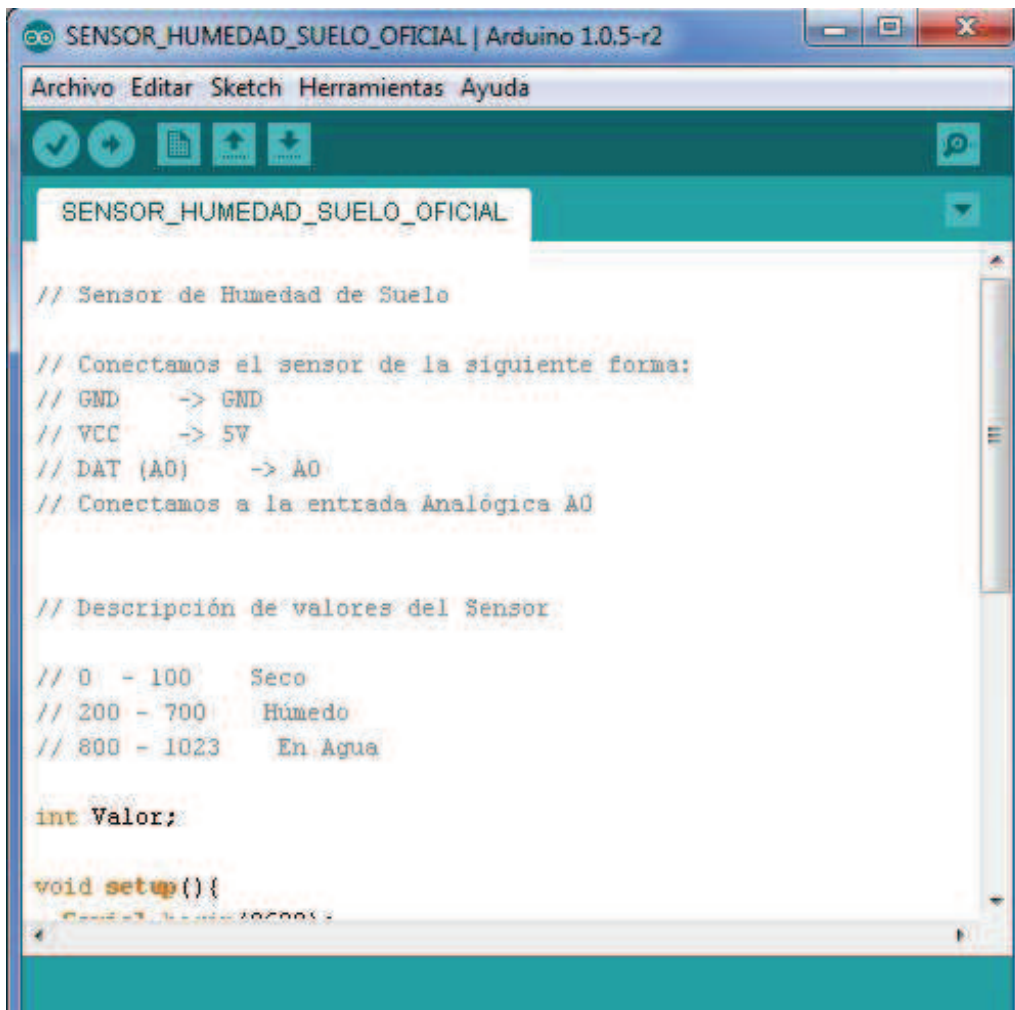
```
TEMP_HUMEDAD_RELAT_OFICIAL $
#define DHT11_PIN 0 // ADC0

byte read_dht11_dat()
{
  byte i = 0;
  byte result=0;
  for(i=0; i< 8; i++)
  {
    while(!(PINC & _BV(DHT11_PIN))); // esperar por 50us
    delayMicroseconds(30);

    if(PINC & _BV(DHT11_PIN))
      result |= (1<<(7-i));
    while((PINC & _BV(DHT11_PIN))); // esperar '1' terminar
  }
  return result;
}

void setup()
```

Figura 4.17: Sketch configurado en nodo Final o nodo router Sensor de Temperatura y Humedad relativa.



```
SENSOR_HUMEDAD_SUELO_OFICIAL | Arduino 1.0.5-r2
Archivo Editar Sketch Herramientas Ayuda

// Sensor de Humedad de Suelo

// Conectamos el sensor de la siguiente forma:
// GND -> GND
// VCC -> 5V
// DAT (A0) -> A0
// Conectamos a la entrada Analógica A0

// Descripción de valores del Sensor

// 0 - 100   Seco
// 200 - 700  Húmedo
// 800 - 1023 En Agua

int Valor;

void setup(){
  Serial.begin(9600);
}
```

Figura 4.18: Sketch configurado en nodo Final o nodo Router Sensor de Humedad del suelo.

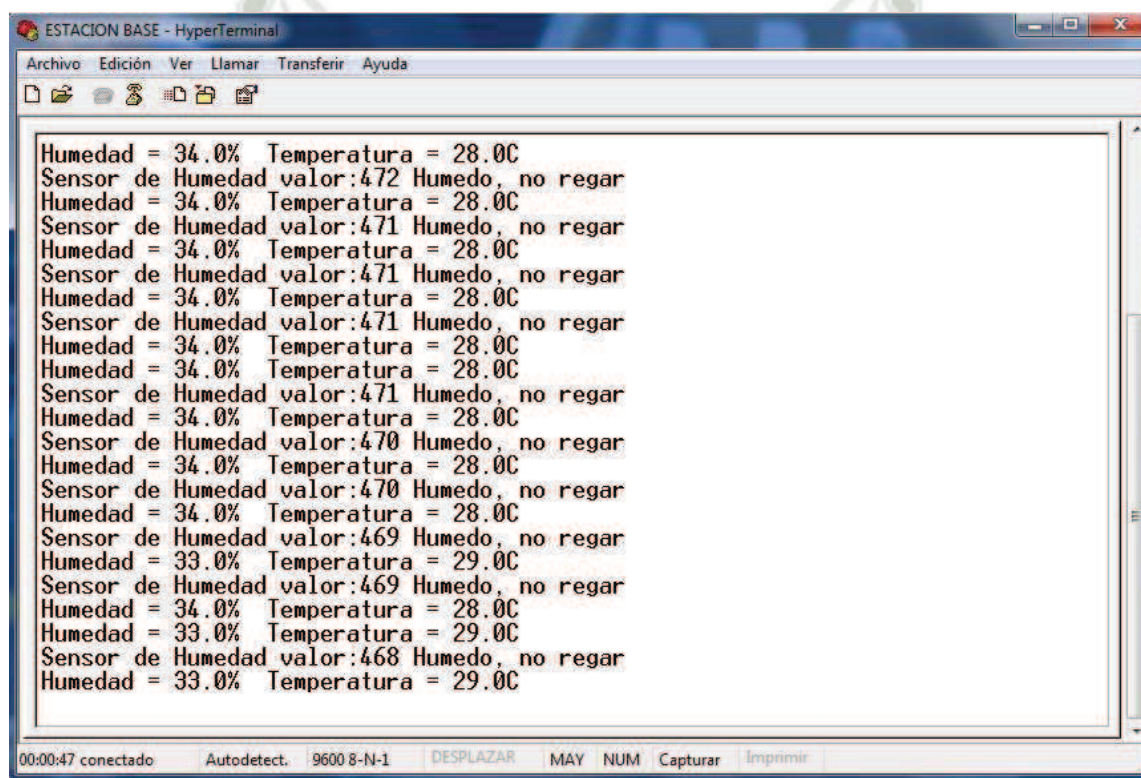
En la figura 4.19 se puede apreciar como el nodo Coordinador recibe los datos enviados por los nodos Router o Nodos Finales, se hace uso del software X-CTU, para visualizar los datos.

Se tuvo especial cuidado al momento de determinar el delay en cada sensor para que se logre una coordinación al momento de recibir los datos de ambos y que estos no se traslapen, para determinar cuál era el mejor delay, se hicieron pruebas en la recepción y se obtuvo un resultado óptimo.



Figura 4.19: Test Recepción de datos en Coordinador en XCTU

Es importante mencionar que se ha logrado recopilar en el nodo Coordinador los datos enviados desde los dispositivos finales o nodos Router, haciendo uso de Hyperterminal, figura 4.20, de esta manera se puede almacenar los mismos en la PC (Estación Base) para su posterior uso y análisis.



```
ESTACION BASE - HyperTerminal
Archivo Edición Ver Llamar Transferir Ayuda
Humedad = 34.0% Temperatura = 28.0C
Sensor de Humedad valor:472 Humedo, no regar
Humedad = 34.0% Temperatura = 28.0C
Sensor de Humedad valor:471 Humedo, no regar
Humedad = 34.0% Temperatura = 28.0C
Sensor de Humedad valor:471 Humedo, no regar
Humedad = 34.0% Temperatura = 28.0C
Sensor de Humedad valor:471 Humedo, no regar
Humedad = 34.0% Temperatura = 28.0C
Humedad = 34.0% Temperatura = 28.0C
Sensor de Humedad valor:471 Humedo, no regar
Humedad = 34.0% Temperatura = 28.0C
Sensor de Humedad valor:470 Humedo, no regar
Humedad = 34.0% Temperatura = 28.0C
Sensor de Humedad valor:470 Humedo, no regar
Humedad = 34.0% Temperatura = 28.0C
Sensor de Humedad valor:469 Humedo, no regar
Humedad = 33.0% Temperatura = 29.0C
Sensor de Humedad valor:469 Humedo, no regar
Humedad = 34.0% Temperatura = 28.0C
Humedad = 33.0% Temperatura = 29.0C
Sensor de Humedad valor:468 Humedo, no regar
Humedad = 33.0% Temperatura = 29.0C
00:00:47 conectado Autodetect. 9600 8-N-1 DESPLAZAR MAY NUM Capturar Imprimir
```

Figura 4.20: Datos en Hyperterminal

No se debe olvidar que para realizar las pruebas se ha escogido un PAN ID de 250, ya que por defecto viene el valor de 0 y por motivos de seguridad y para

dejar libre este ID para futuras pruebas se debe cambiar como una buena práctica. Es obligatorio para todos los dispositivos participantes tener el mismo PAN ID así como operar en el mismo Canal en nuestro caso canal E, para poder trabajar en la red sin ningún problema.

Una vez realizadas todas las pruebas tanto de implementación en las distintas configuraciones, así como haber realizado las pruebas de cobertura con los módulos XBee Serie 2, concluimos que nuestro diseño e implementación de la red inalámbrica de sensores cumple con los parámetros mínimos establecidos en las distintas hojas de datos de nuestros elementos de la red, para asegurar una correcta comunicación inalámbrica.

Se pudo demostrar la eficiencia de nuestros elementos utilizados, que al ser más sencillos y de menor costo lograron trabajar y cumplir con la misma función que los sistemas o módulos existentes y más complejos.

Además se logró monitorear y almacenar los datos recogidos por los sensores sin pérdidas de paquetes considerables, esto con respecto a la cobertura, así también se logró dotar de energía limpia es decir energía renovable para nuestros módulos sin ningún problema.

Se muestra a continuación unas fotografías de los módulos instalados en el prototipo del terreno de cultivo:



Figura 4.21: Prototipo de terreno de cultivo y área de ubicación de los nodos de la Red Inalámbrica de Sensores.

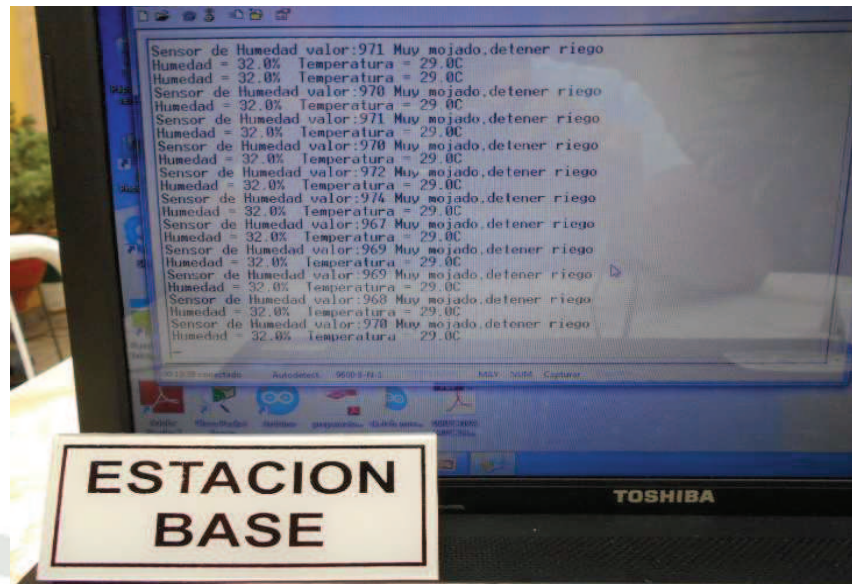


Figura 4.22: Estación Base



Figura 4.23: Nodo Coordinador



Figura 4.24: Nodo Router – Sensor Humedad y Temperatura Relativa



Figura 4.25: Nodo Final – Sensor Humedad del Suelo



Figura 4.26: Panel Solar



Figura 4.27: Medida de Voltaje-Panel Solar

CAPÍTULO V



Para realizar el análisis económico, sobre los costos de producción de todo el Diseño de la Red Inalámbrica de Sensores con aplicación en el desarrollo de Agricultura de Precisión, primeramente veremos en forma somera, los costos de otros Equipos similares, producidos por Empresas dedicadas a estos Rubros.

Así, por ejemplo, tenemos a National Instruments, una empresa Americana que se dedica al desarrollo y venta de productos de software, hardware y servicios, específicamente nos ofrece una alternativa para la adquisición de datos, con su paquete de inicio de Red Inalámbrica de Sensores (WSN), en la actualidad tiene un costo promedio de entre 2000 y 3000 Dólares Americanos, claro está, sin contar con el pago del Flete Aéreo y los Seguros correspondientes.

Este precio promedio es precio CIP (Carriage and Insurance Paid To - Transporte y seguro pagado hasta lugar de destino convenido) y es puesto solo en el Aeropuerto Jorge Chávez- LIMA. Así mismo el pago debe ser con Carta de Crédito irrevocable y confirmada. Referente al despacho, éste tiene que ser por avión, debido a su fragilidad, mientras que el envío, será de aproximadamente en un plazo de 03 meses. El Desaduanaje, también estará a cargo del Cliente. Se estima, que al costo del precio CIP, se le debe incrementar casi el 65 % para obtener el precio de venta en nuestro mercado.

Podemos mencionar también a Exemys una empresa Argentina de Tecnología, dedicada a fabricar productos de Telemetría, Conectividad y Adquisición de variables remotas y dispersas, nos ofrece una solución wREMOTE

basada en redes inalámbricas de sensores (WSN), en la actualidad tiene un costo promedio de 1000 Dólares Americanos, las Condiciones, Formas de pago y Plazos son similares a la anterior Empresa.

En los casos anteriores, hemos abordado a empresas que nos brindan soluciones en redes inalámbricas de sensores WSN, que se ajustan a nuestra aplicación, pero también debemos mencionar otros elementos que intervienen en la Agricultura de Precisión, como Dataloggers y Sensores.

Daremos a continuación, un alcance de algunos precios unitarios de Módulos de diferentes empresas, a fin de tener una idea general sobre dichos costos.

| Descripción | Precio |
|---|--------|
| Wireless Sensor System Web - Based Monitoring OMEGA | \$ 900 |
| Datalogger - HOBO PRO V2 | € 180 |
| Medidor de humedad de tierra TDR 100 | € 745 |
| Medidor de humedad PCE- THB 38 | € 105 |

Tabla 5.1: Precios de elementos

5.1 COSTO DE LOS COMPONENTES ELECTRÓNICOS

Uno de los objetivos de éste proyecto es el de poder hacer una red inalámbrica de sensores de bajo costo y de ésta manera hacerlo accesible para los usuarios finales.

Para la construcción de la red inalámbrica de sensores se utilizarán dispositivos XBee S2, módulo Arduino UNO, Shield XBee Arduino, Sensor de Humedad Suelo, Sensor Temperatura y Humedad relativa, chasis para los módulos, conectores, cable de programación, baterías, celdas solares. En las tabla 5.2, 5.3 y 5.4 se especifica el costo de cada componente por separado tanto del equipo coordinador, equipo router y del equipo terminal respectivamente.

| COSTOS | | | |
|---------------------------|----------|--------------------------|-------|
| COMPONENTE | CANTIDAD | PRECIO UNITARIO (S./) | TOTAL |
| Arduino Uno | 1 | 85.00 | 85.00 |
| XBee S2 | 1 | 90.00 | 90.00 |
| Shield XBee Arduino | 1 | 60.00 | 60.00 |
| Chasis | 1 | 46.80 | 46.80 |
| Cable USB estándar A/B | 1 | 8.00 | 8.00 |

Tabla 5.2: Costo de Componentes del Equipo Coordinador

| COSTOS | | | |
|--|----------|--------------------------|--------|
| DISPOSITIVOS | CANTIDAD | PRECIO UNITARIO (S./) | TOTAL |
| Arduino Uno | 2 | 85.00 | 170.00 |
| XBee S2 | 2 | 90.00 | 180.00 |
| Shield XBee Arduino | 2 | 60.00 | 120.00 |
| Sensor Humedad Suelo | 1 | 9.90 | 9.90 |
| Sensor Temperatura - Humedad Relativa | 1 | 22.00 | 22.00 |
| Chasis | 2 | 46.80 | 93.60 |
| Set de cables M/M 15 cm | 1 | 12.00 | 12.00 |
| Cable USB estándar A/B | 1 | 8.00 | 8.00 |
| Celda Solar | 2 | 105.00 | 210 |

Tabla 5.3: Costo de Componentes del Equipo Router/Final

5.2 COSTO TOTAL DEL PROYECTO Y RENTABILIDAD

Teniendo en cuenta los costos establecidos para el equipo coordinador, router y equipo terminal, además proyectando que ésta red inalámbrica de sensores será usada en un terreno de cultivo, los costos de cada equipo serían:

| | COSTO (S/.) | CANTIDAD | TOTAL (S/.) |
|---------------------------|--------------------|-----------------|--------------------|
| Equipo Coordinador | 199.80 | 1 | 289.80 |
| Equipo Terminal | 715.50 | 2 | 825.50 |

Tabla 5.4: Costo del Sistema

Dando un **COSTO TOTAL DE EQUIPAMIENTO** de: **S/.1115.3**

A continuación, hay que sumar los costos de mano de obra y la instalación:

| | COSTO (S/.) | CANTIDAD | TOTAL (S/.) |
|---------------------|--------------------|-----------------|--------------------|
| Mano de Obra | 70.00 | 3 | 210.00 |
| Instalación | 100.00 | 3 | 300.00 |

Tabla 5.5: Costo mano de obra e instalación

Dando un **COSTO TOTAL DE INGENIERIA** de: **S/.410.00**

Finalmente se suman los costos de equipamiento e ingeniería:

$$\text{S/.1115.3 (Costo de equipamiento) + S/.410.00 (Costo de ingeniería) =}$$

$$\text{S/.1525.3}$$

Como se ve, el costo total de la red inalámbrica de sensores tiene un valor de **S/.1525.3**

La red inalámbrica de sensores presenta un Costo unitario final de:

$$PFU = \frac{COSTOTOTAL}{NUMERODERE DINALAMBRI CA} = \frac{1525.3}{1} = 1525.3$$

El precio obtenido, es menor en comparación a los precios promedios de otros Módulos existentes en el Mercado, en los cuales hay que pagar hasta 5 veces más por los equipos y por sensores, lo que nos da la posibilidad de competir con ellos ya que resulta más rentable. Además al ser un prototipo, seguramente, el precio podría disminuir considerablemente para posteriores implementaciones.

CAPITULO VI



CONCLUSIONES

1. El sistema diseñado e implementado es capaz de realizar la lectura de entradas analógicas (sensores de humedad y temperatura), y detectar la variación de cada una de estas sin necesidad de cableado adicional, utilizando el medio inalámbrico (Protocolo ZigBee) y para la visualización de los mismos, se hace directamente en la estación base (PC) y por medio de un fichero de texto que recoge y almacena los datos monitorizados para su posterior análisis. Por ello se convierte en una solución óptima para el monitoreo de distintos tipos de cultivos en el sector agrario, donde existe la posibilidad de ampliación en cualquier momento dando flexibilidad al proyecto.
2. Al utilizar y disponer de Energía Renovable con el uso de Paneles Solares además de baterías y de los módulos XBee S2, se logró un importante ahorro en el consumo de energía debido a las características técnicas óptimas de los mismos según lo requerido en el proyecto.
3. El costo de los elementos del sistema implementado hace que resulte viable tanto técnica como económicamente, en comparación con otros sistemas y tecnologías ya desarrolladas.
4. Según la naturaleza de los equipos utilizados se tiene que aceptar que existirá cierto riesgo inherente y asumible ya sea por un posible robo por exposición de cajas, un solo nodo coordinador, daño de los equipos por terceros etc..

RECOMENDACIONES

1. Teniendo en cuenta posibles expansiones sería recomendable tener en consideración la inclusión de algún sistema operativo específico para redes de baja potencia como podría ser el caso de TinyOS o Contiki. A pesar de que la programación en Arduino es más ligera, los sistemas operativos para WSN proporcionan una programación basada en eventos que junto con la posibilidad de desarrollar otras aplicaciones para los nodos mejoran el rendimiento y el uso de los recursos.
2. Para futuras aplicaciones de áreas más extensas y seguir utilizando la tecnología ZigBee, solo tendríamos que necesitar otro tipo de módulo XBee de una versión superior, que utilice un tipo de antena de mayor alcance y potencia y el sistema funcionará con total normalidad abarcando más áreas.
3. La implementación de claves de cifrado y la mejora de la seguridad es un punto muy importante que se ha de tener en cuenta para evitar la manipulación y/o robo de información. Para ello se podría implementar adicional al proyecto un sistema de seguridad con cámaras IP, para tener monitoreo sobre la seguridad de los módulos.

ANEXO I

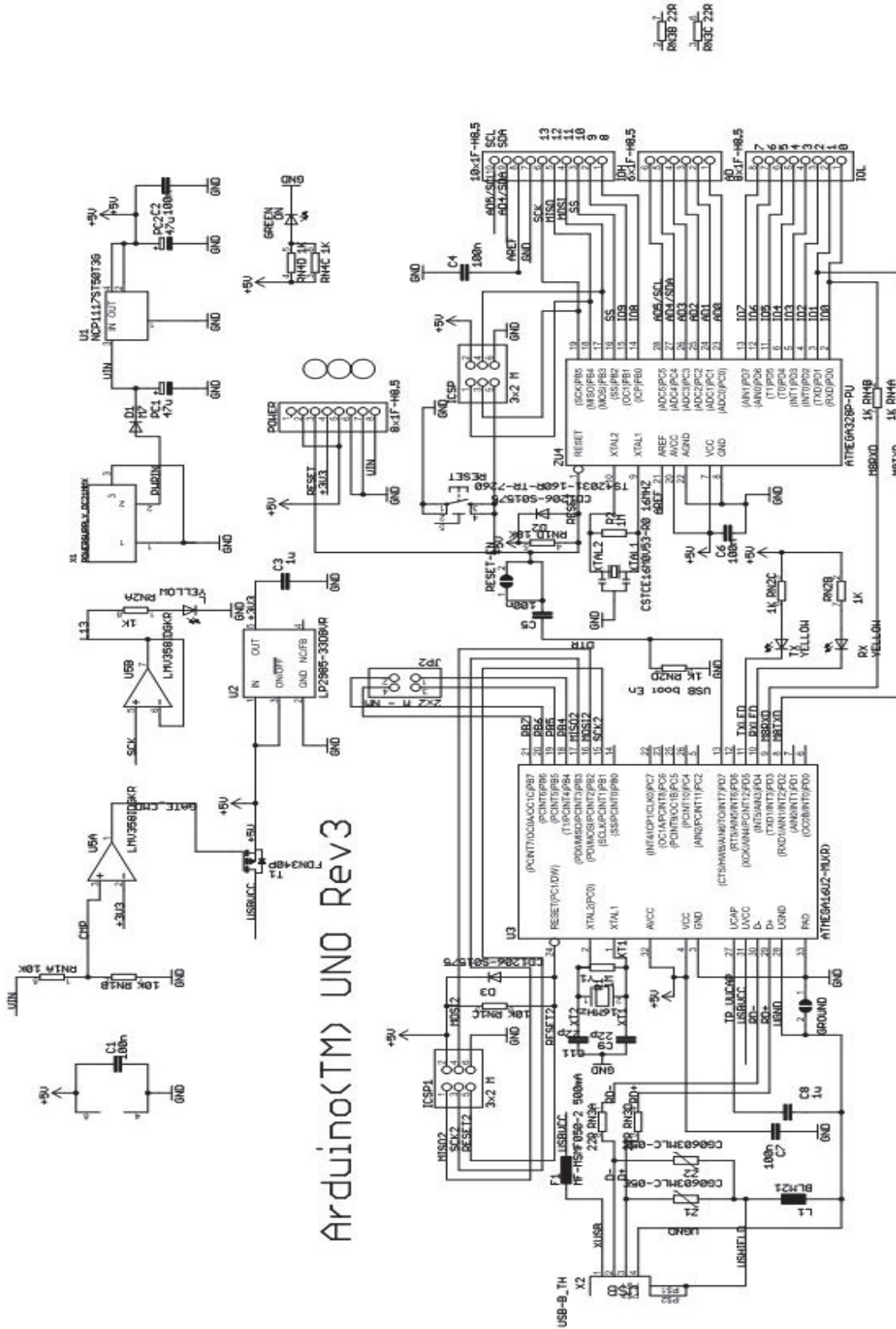
DIAGRAMAS ESQUEMATICOS



➤ **DIAGRAMA ESQUEMATICO ARDUINO UNO**



Anexo I: Diagramas Esquemáticos



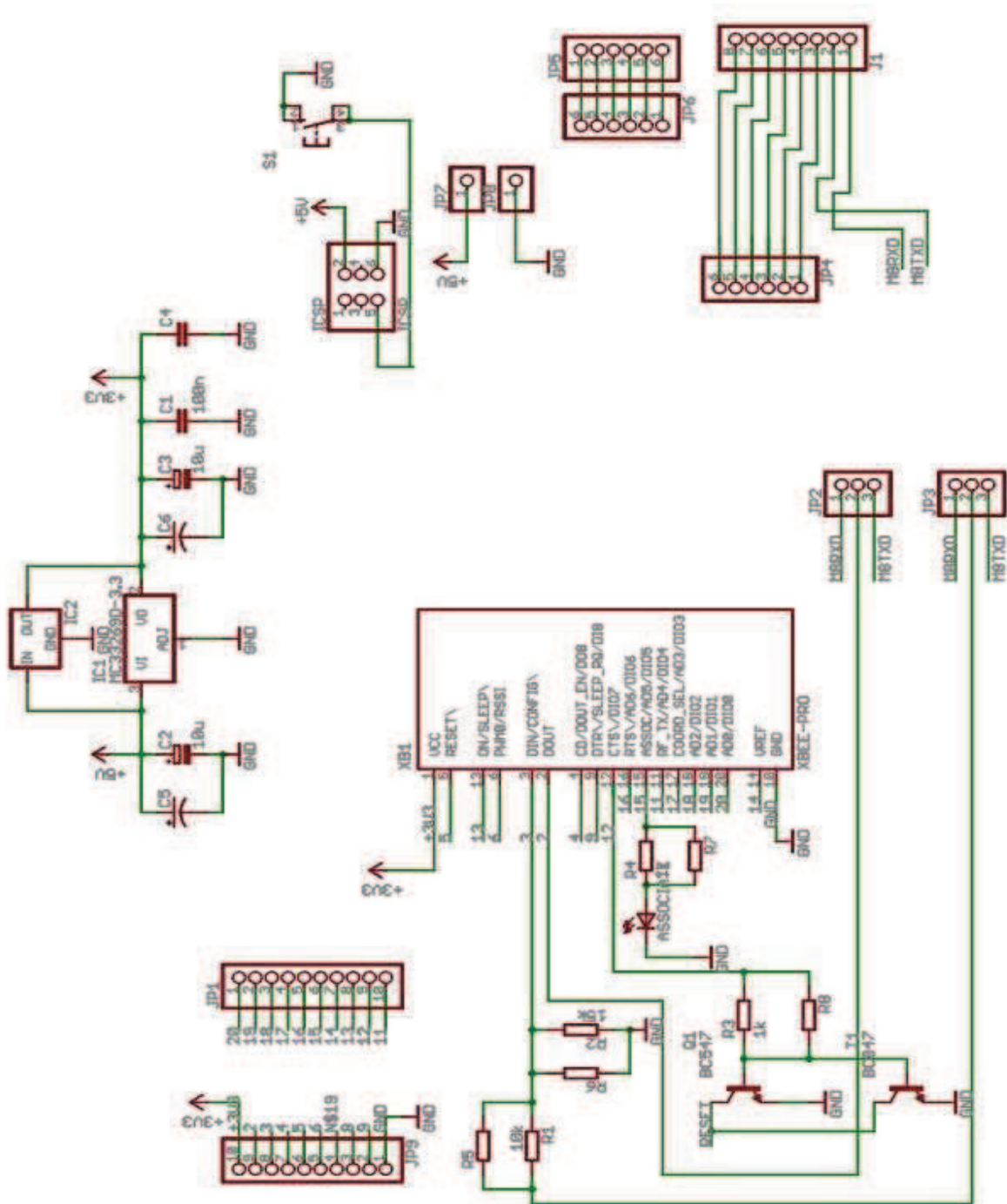
Arduino(TM) UNO Rev3

Reference Designs ARE PROVIDED "AS IS" AND "WITH ALL FAULTS. ARDUINO DISCLAIMS ALL OTHER WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, REGARDING PRODUCTS, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO, ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. ARDUINO may make changes to specifications and product descriptions at any time, without notice. The Customer must not rely on the absence or characteristics of any features or instructions marked "reserved" or "undefined." ARDUINO reserves these for future definition and shall have no responsibility whatsoever for conflicts or incompatibilities arising from future changes to them. The product information on the web site or Materials is subject to change without notice. Do not finalize a design with this information. ARDUINO is a registered trademark. Use of the ARDUINO name must be compliant with <http://www.arduino.cc/en/Main/Policy>

➤ **DIAGRAMA ESQUEMATICO XBEE SHIELD**



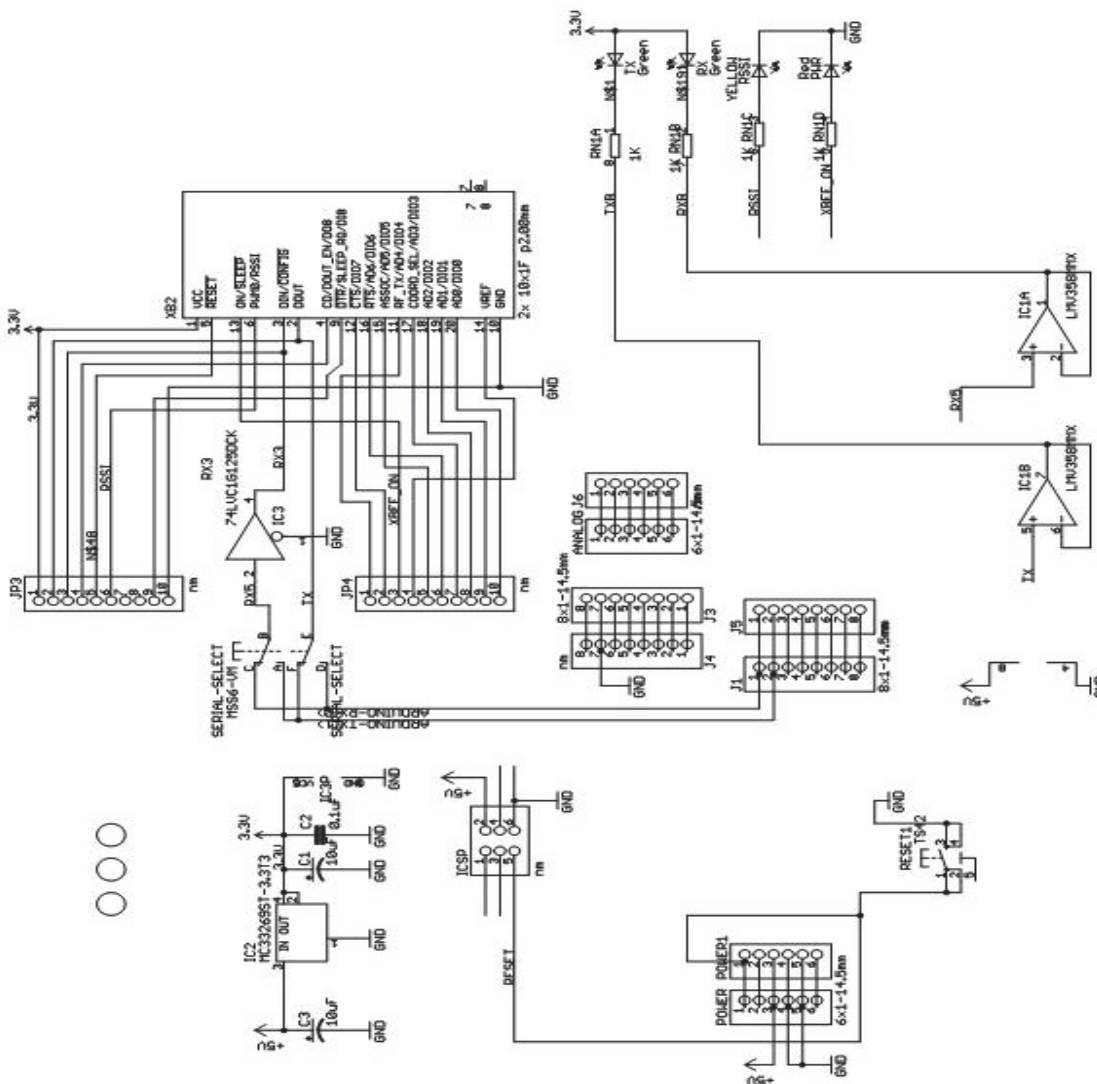
Anexo I: Diagramas Esquemáticos



➤ **DIAGRAMA ESQUEMÁTICO WIRELESS SHIELD XBEE**



Anexo I: Diagramas Esquemáticos



Reference Designs ARE PROVIDED "AS IS" AND "WITH ALL FAULTS. Arduino DISCLAIMS ALL OTHER WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, REGARDING PRODUCTS, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO, ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. Arduino may make changes to specifications and product descriptions at any time, without notice. The Customer must not rely on the absence or characteristics of any features or instructions marked "reserved" or "undefined." Arduino reserves these for future definition and shall have no responsibility whatsoever for conflicts or incompatibilities arising from future changes to them. The product information on the Web Site or Materials is subject to change without notice. Do not finalize a design with this information. ARDUINO is a registered trademark.

ANEXO II



Product Datasheet

XBee® ZigBee®/Mesh RF Modules

Embedded RF Modules for OEMs

Providing critical end-point connectivity to Digi's Drop-in Networking product family, XBee ZigBee/Mesh RF modules are low-cost and easy to deploy.



Features/Benefits

- ZigBee/mesh and proprietary peer-to-peer mesh topologies
- 2.4 GHz for worldwide deployment
- Fully interoperable with other Digi Drop-in Networking products, including gateways, device adapters and extenders
- Common XBee footprint for a variety of RF modules
- Low-power sleep modes
- Multiple antenna options
- Industrial temperature rating (-40° C to 85° C)
- Low-power and long-range variants available

Overview

XBee Product Family

The XBee family of embedded RF modules provides OEMs with a common footprint shared by multiple platforms, including multipoint and ZigBee/mesh topologies, and both 2.4 GHz and 900 MHz solutions. OEMs deploying the XBee can substitute one XBee for another, depending upon dynamic application needs, with minimal development, reduced risk and shorter time-to-market.

Why XBee ZigBee/Mesh RF Modules?

For applications where robust mesh networking topologies are preferred, XBee ZigBee/mesh OEM RF modules provide developers with both ZigBee mesh and the soon-to-be-released proprietary DigiMesh™ topologies. These networks allow devices to harness the entire network of RF modules to effectively extend range beyond that of a single module, and create a more stable and reliable network. Employing dynamic self-healing, self-discovery functionality for reliable communications, XBee ZigBee/mesh OEM RF modules make mesh networking simple and easy to deploy.

Drop-in Networking End-Point Connectivity

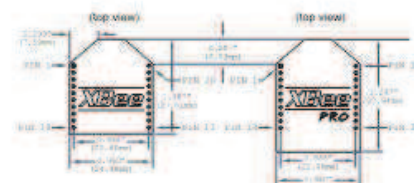
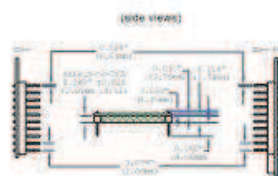
XBee OEM RF modules are part of Digi's Drop-in Networking family of end-to-end connectivity solutions. By seamlessly interfacing with compatible gateways, device adapters and extenders, the XBee embedded RF modules provide developers with true beyond-the-horizon connectivity.

www.digi.com



Anexo II: XBee DataSheet

| Platform | XBee® ZNet 2.5 (Series 2) | XBee-PRO® ZNet 2.5 (Series 2) |
|----------------------------------|---|---|
| Performance | | |
| RF Data Rate | 250 kbps | 250 kbps |
| Indoor/Urban Range | 133 ft (40 m) | 300 ft (100 m) |
| Outdoor/RF Line-of-Sight Range | 400 ft (120 m) | 1 mi (1.6 km) |
| Transmit Power | 1.25 mW (+1 dBm) / 2 mW (+3 dBm) boost mode | 50 mW (+17 dBm) / Int'l 10 mW (+10 dBm) |
| Receiver Sensitivity (1% PER) | -97 dBm (-98 dBm boost mode) | -102 dBm |
| Features | | |
| Serial Data Interface | 3.3V CMOS UART | 3.3V CMOS UART |
| Configuration Method | API or AT Commands, local or over-the-air | API or AT Commands, local or over-the-air |
| Frequency Band | 2.4 GHz | 2.4 GHz |
| Interference Immunity | DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) | DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) |
| Serial Data Rate | 1200 bps - 1 Mbps | 1200 bps - 1 Mbps |
| ADC Inputs | (4) 10-bit ADC inputs | (4) 10-bit ADC inputs |
| Digital I/O | 10 | 10 |
| Antenna Options | Chip, Wire Whip, U.FL, RPSMA | Chip, Wire Whip, U.FL & RPSMA |
| Networking & Security | | |
| Encryption | 128-bit AES | 128-bit AES |
| Reliable Packet Delivery | Retries/Acknowledgments | Retries/Acknowledgments |
| IDs and Channels | PAN ID, 64-bit IEEE MAC, 16 Channels | PAN ID, 64-bit IEEE MAC, 13 Channels |
| Power Requirements | | |
| Supply Voltage | 2.1 - 3.6VDC | 3.0 - 3.6VDC |
| Transmit Current | 35 mA / 45 mA boost mode @ 3.3VDC | 285 mA @ 3.3VDC |
| Receive Current | 38 mA / 40 mA boost mode @ 3.3VDC | 45 mA @ 3.3VDC |
| Power-Down Current | $\leq 1 \mu A$ @ 25° C | $\leq 1 \mu A$ @ 25° C |
| Regulatory Approvals | | |
| FCC (USA) | Yes | Yes |
| IC (Canada) | Yes | Yes |
| ETSI (Europe) | Yes | Yes (Int'l Unit Only) |
| C-TICK (Australia) | Yes | Pending |
| Telec (Japan) | Yes | Pending (Int'l, Unit Only) |



Please visit www.digi.com for part numbers.

DIGI SERVICE AND SUPPORT - You can purchase with confidence knowing that Digi is here to support you with expert technical support and a one-year warranty. www.digi.com/support

WHEN
RELIABILITY
MATTERS™

Digi International
11901 Bren Road E.
Minnetonka, MN 55343
U.S.A.
PH: +877-912-3444
952-912-3444
FX: +952-912-4952
email: info@digi.com

Digi International
France
31 rue des Poissonniers
92700 Neuilly sur Seine
PH: +33-1-55-61-98-98
FX: +33-1-55-61-98-99
www.digi.fr

Digi International
KK
NLS Building South 8F
22-14 Sakuragaoka-cho,
Shibuya-ku
Tokyo 150-0031, Japan
PH: +81-3-5428-0261
FX: +81-3-5428-0262
www.digi-intl.co.jp

Digi International
(HK) Limited
Suite 1703-05, 17/F,
K Wah Centre
191 Java Road
North Point, Hong Kong
PH: +852-2833-1008
FX: +852-2572-9989
www.digi.cn

Digi International, the leader in device networking for business, develops reliable products and technologies to connect and securely manage local or remote electronic devices over the network or via the web. With over 20 million parts shipped worldwide since 1985, Digi offers the highest levels of performance, flexibility and quality.

www.digi.com

© 2006-2008 Digi International Inc.

All rights reserved. Digi, Digi International, the Digi logo, the When Reliability Matters logo, DigiMesh, XBee and XBee-PRO are trademarks or registered trademarks of Digi International Inc. in the United States and other countries worldwide. All other trademarks are the property of their respective owners.

91001413
B1/308



ANEXO III



SENSOR DE HUMEDAD Y TEMPERATURA DHT11



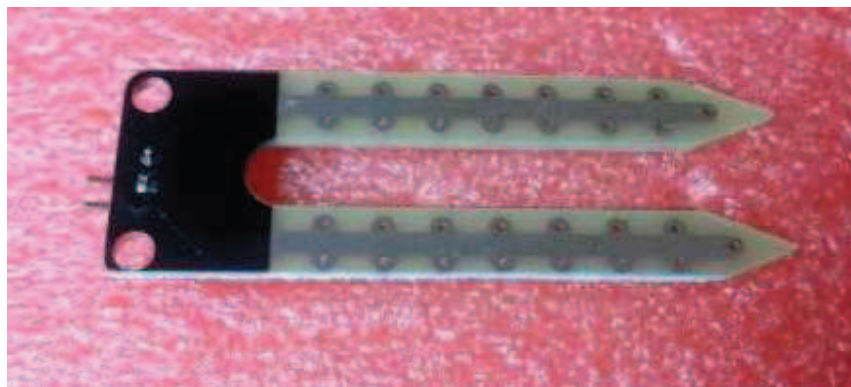
Sensor de humedad y temperatura de muy bajo costo. La salida suministrada es de tipo digital, no requiriéndose utilizar entradas analógicas. El sensor de humedad es de tipo capacitivo, mientras que la medición de temperatura se efectúa mediante un termistor.

| CARACTERISTICAS | |
|----------------------------------|---------------------------------|
| Tensión de operación | 3 a 5 VDC |
| Corriente de Operación | 1.5 mA max |
| Rango de medición de humedad | 20-80% - $\pm 5\%$ de exactitud |
| Rango de medición de temperatura | 0-50°C - $\pm 2\%$ de exactitud |
| Máxima velocidad de muestreo | 1Hz |
| Tamaño | 15.5x12x5.5 mm |

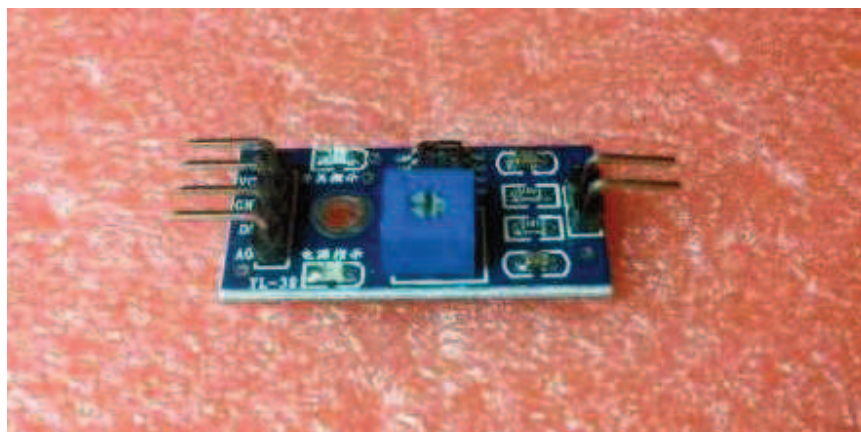
| PINES | |
|-------|-------------|
| PIN | DESCRIPCION |
| 1 | DATA |
| 2 | VCC (+5V) |
| 3 | GND |

MODULO SENSOR DE HUMEDAD DE SUELO-TIERRA

Módulo YL-69



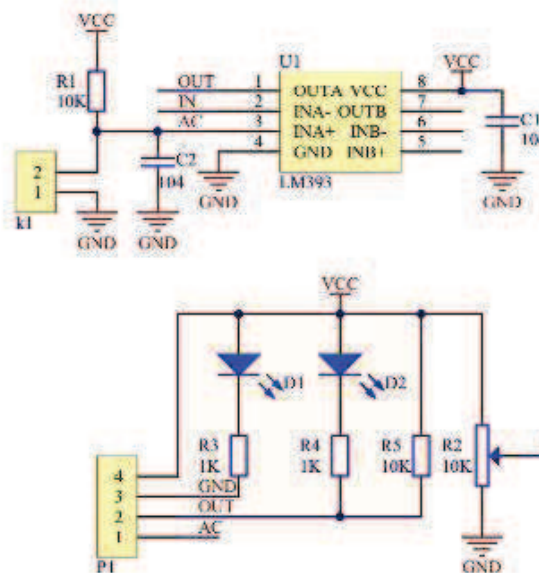
Módulo YL-38:



| CARACTERISTICAS | |
|--------------------------|-------------|
| Tensión de alimentación | 3.3V a 5V |
| Dimensiones Módulo YL-38 | 30mm x 16mm |
| Dimensiones Módulo YL-69 | 60mm x 30mm |

| DESCRIPCION DE PINES | |
|----------------------|---|
| VCC | Tensión de alimentación |
| GND | Tierra |
| A0 | Salida analógica que entrega una tensión proporcional a la humedad. Puede ser medida directamente desde un puerto analógico en un microcontrolador, con Arduino, CI, etc. |
| D0 | Salida digital, éste módulo permite ajustar cuándo el nivel lógico en esta salida pasa de bajo a alto mediante el potenciómetro. |

Esquema eléctrico módulo YL-38:



ANEXO IV



ESTRUCTURA LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN ARDUINO

ESTRUCTURA LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN ARDUINO

Un programa Arduino puede correr en dos partes:

- void **setup()**
- void **loop()**

Setup() es la preparación, y loop() es la ejecución. En la sección setup(), que se encuentra siempre al comienzo de tu programa, se configuran los **pinModes**, se inicializa la comunicación serial, etc. En la sección loop() se encuentra el código que será ejecutado, como lectura de entradas, disparo de salidas, etc.

- Variable Declaration
- Function Declaration

Estructuras de Control

- if
- if...else
- for
- switch case
- while
- do... while
- break
- continue
- return

Sintaxis

- ; (punto y coma)
- {} (paréntesis de corchetes)
- // (comentario simple de línea)
- /* */ (comentario multilínea)

Operadores Aritméticos

- **plus** (adición)
- - (sustracción)
- * (multiplicación)
- / (división)
- % (módulo)

Operadores de comparación

- == (igual a)
- != (distinto a)
- < (menor que)
- > (mayor que)
- <= (menor o igual que)
- >= (mayor o igual que)

Operadores Booleanos

- && (and)
- || (or)
- ! (not)

Operadores Compuestos

- ++ (incremento)
- -- (decremento)
- += (adición compuesta)
- -= (sustracción compuesta)
- *= (multiplicación compuesta)
- /= (división compuesta)

VARIABLES

Las Variables con expresiones que puedes usar en programas para guardar valores, como lectura de sensores desde un pin análogo.

CONSTANTES

Las Constantes son valores particulares con significado especial.

- **HIGH | LOW**
- **INPUT | OUTPUT**
- **true | false**
- **Integer Constants**

TIPOS DE DATOS

Las variables pueden tener varios tipos de datos, los cuales se describen a continuación.

- boolean
- char
- byte
- int
- unsigned int
- long
- unsigned long
- float
- double
- string
- array

FUNCIONES

Entrada/Salida Digital

- **pinMode**(pin, modo)
- donde modo=INPUT o modo=OUTPUT
- **digitalWrite**(pin, valor)

Anexo IV: Estructura lenguaje de programación Arduino

- `int digitalRead(pin)`

Entrada/Salida Analógica

- `int analogRead(pin)`
- `analogWrite(pin, value)` - PWM

Entrada/Salida Avanzado

- `shiftOut(dataPin, clockPin, bitOrder, valor)`
- `unsigned long pulseIn(pin, valor)`

Tiempo

- `unsigned long millis()`
- `delay(ms)`
- `delayMicroseconds(us)`

Matemáticas

- `min(x, y)`
- `max(x, y)`
- `abs(x)`
- `constrain(x, a, b)`

Números al azar

- `randomSeed(seed)`
- `long random(max)`
- `long random(min, max)`

COMUNICACIÓN SERIAL

Se utiliza para la comunicación entre la placa Arduino y un computador u otro dispositivo. Esta comunicación sucede a través de la conexión serial de la placa Arduino o USB y sobre los pines digitales 0 (RX) ó 1 (TX). Luego, si usas estas funciones, no puedes tampoco usar estos pines como entrada o salida digital.

Anexo IV: Estructura lenguaje de programación Arduino

- **Serial.begin**(velocidad)
- int **Serial.available**()
- int **Serial.read**()
- **Serial.flush**()
- **Serial.print**(data)
- **Serial.println**(data)



ANEXO V



SKETCH SENSOR DE HUMEDAD DE SUELO

```
// Sensor de Humedad de Suelo

// Conectamos el sensor de la siguiente forma:

// GND -> GND

// VCC -> 5V

// DAT (A0) -> A0

// Conectamos a la entrada Analógica A0

// Descripción de valores del Sensor

// 0 - 100   Seco

// 200 - 700  Húmedo

// 800 - 1023 En Agua

int Valor;

void setup()

{

  Serial.begin(9600);

  Serial.println("TOMA LECTURA HUMEDAD SUELO");

}

void loop()

{

  Serial.print("Sensor de Humedad valor:");

  Valor = analogRead(A0);

  Serial.print(Valor);
```

```
if (Valor <= 100)
    Serial.println(" Seco, necesario regar");
if ((Valor > 200) and (Valor <= 700))
    Serial.println(" Húmedo, no regar");
if (Valor > 800)
    Serial.println(" Muy mojado, detener riego");
delay(2000);
}
```



SKETCH SENSOR DE HUMEDAD-TEMPERATURA RELATIVA

```
#define DHT11_PIN 0 // ADC0

byte read_dht11_dat()
{
  byte i = 0;
  byte result=0;
  for(i=0; i < 8; i++)
  {
    while(!(PINC & _BV(DHT11_PIN))); // esperar por 50us
    delayMicroseconds(30);
    if(PINC & _BV(DHT11_PIN))
      result |= (1 << (7-i));
    while((PINC & _BV(DHT11_PIN))); // esperar '1' terminar
  }
  return result;
}

void setup()
{
  DDRC |= _BV(DHT11_PIN);
  PORTC |= _BV(DHT11_PIN);
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Ready");
}

void loop()
```

```
{
  byte dht11_dat[5];
  byte dht11_in;
  byte i;
  // start condition
  // 1. pull-down i/o pin from 18ms
  PORTC &= ~_BV(DHT11_PIN);
  delay(18);
  PORTC |= _BV(DHT11_PIN);
  delayMicroseconds(40);
  DDRC &= ~_BV(DHT11_PIN);
  delayMicroseconds(40);
  dht11_in = PINC & _BV(DHT11_PIN);
  if(dht11_in)
  {
    Serial.println("dht11 start condition 1 not met");
    return;
  }
  delayMicroseconds(80);
  dht11_in = PINC & _BV(DHT11_PIN);
  if(!dht11_in)
  {
    Serial.println("dht11 start condition 2 not met");
    return;
  }
  delayMicroseconds(80);
```

```
// now ready for data reception
for (i=0; i<5; i++)
dht11_dat[i] = read_dht11_dat();
DDRC |= _BV(DHT11_PIN);
PORTC |= _BV(DHT11_PIN);
byte dht11_check_sum = dht11_dat[0]+dht11_dat[1]+dht11_dat[2]+dht11_dat[3];
// check check_sum
if(dht11_dat[4]!= dht11_check_sum)
{
  Serial.println("DHT11 checksum error");
}
Serial.print("Humedad = ");
Serial.print(dht11_dat[0], DEC);
Serial.print(".");
Serial.print(dht11_dat[1], DEC);
Serial.print("% ");
Serial.print("Temperatura = ");
Serial.print(dht11_dat[2], DEC);
Serial.print(".");
Serial.print(dht11_dat[3], DEC);
Serial.println("C ");
delay(2500);
}
```

ANEXO VI

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS



Páginas Web

- AGRICULTURA DE PRECISION
[http://es.wikipedia.org/wiki/Agricultura de precisi%C3%B3n](http://es.wikipedia.org/wiki/Agricultura_de_precisi%C3%B3n)
- ARDUINO
<http://es.wikipedia.org/wiki/Arduino>
- ARDUINO _ INTRODUCTION
<http://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>
- ARDUINO UNO
<http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>
- ARDUINO _ FAQ
<http://arduino.cc/en/Main/FAQ>
- LIBRERÍAS ARDUINO EN GENERAL
<http://arduino.cc/en/Reference/HomePage>
- DIGI INTERNATIONAL: MAKING WIRELESS M2M EASY - ESPAÑOL
<http://www.digi.com/es/>
- XBEE - MÓDULOS DE TRANSMISIÓN INALAMBRICA - APLICACIONES
<http://www.xbee.cl/>
- X-CTU CONFIGURATION & TEST UTILITY SOFTWARE USER GUIDE -
DIGI INTERNATIONAL
http://ftp1.digi.com/support/documentation/90001003_A.pdf
- ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO
http://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_electromagn%C3%A9tico
- ZONAS DE FRESNEL EN REDES INALAMBRICAS _ YOUBLISHER
<http://www.youblisher.com/p/163794-Zonas-de-Fresnel-en-redes-inalambricas/>
- CÁLCULO DE ZONA DE FRESNEL - TAMAX INTERNET INALÁMBRICA
<http://tamax.com.ar/blog/?p=517>
- ZONAFRESNEL_UFT - HOME - WIKISPACES
<http://zonafresnel-uft.wikispaces.com/>

- PROGRAMACION ARDUINO
[HTTP://WWW.ARDUINO.CL/INT/LENGUAJE.HTML](http://www.arduino.cl/int/lenguaje.html)

Documentos PDF Web

- ANDRÉS OYARCE INGENIERÍA MCI LTDA
ZIGBEE Teoría DIGI
- DIGI INTERNATIONAL, INC. - 2012
Manual XBEE DIGI
- DIGI INTERNATIONAL, INC. - 2009
RANGE Test DIGI
- BRIAN W. EVANS EDICIÓN ESPAÑOLA
Arduino Programing Notebook ES
- GRUPO DE RADIOCOMUNICACIÓN
DEPARTAMENTO SSR ETSIT- UPM FEBRERO DE 2007
Manual Radiomobile

Libros

- FUNDAMENTOS DE REDES INALÁMBRICAS
Cisco Systems Madrid: Cysco Systems, 2006
- SISTEMAS ELECTRÓNICOS DE COMUNICACIONES 2DA ED.
Blake Ray México: International Thomson, 2004
- CÓMO FUNCIONAN LAS REDES INALÁMBRICAS
Gralla, Preston Madrid: Anaya, 2007
- COMUNICACIONES Y REDES DE COMPUTADORAS 7A ED.
Stallings, William Madrid: Pearson Education, 2004