



UNIVERSIDAD
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL
PIRHUA

IMPLEMENTACIÓN DE RTU INALÁMBRICA USANDO ZIGBEE

Víctor Hugo Millones Cayotopa

Piura, Diciembre 2012

FACULTAD DE INGENIERÍA

Área Departamental de Ingeniería Mecánico – Eléctrica

Millones, V. (2012). *Implementación de RTU inalámbrica usando ZigBee*. Tesis de pregrado en Ingeniería Mecánico Eléctrica. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Mecánico Eléctrica. Piura, Perú.



Esta obra está bajo una [licencia Creative Commons Atribución-
NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](#)

Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura

UNIVERSIDAD DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERIA



“IMPLEMENTACION DE RTU INALAMBRICA USANDO ZIGBEE”

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Mecánico Eléctrico

VICTOR HUGO MILLONES CAYOTOPA

Asesor: Dr. Justo Oquelis Cabredo

Piura, Diciembre 2012

Gracias a mi familia y a
Dios que guía mis pasos.

Prologo

La tesis desarrollada tiene como objetivo proponer el diseño de una unidad terminal remota (RTU, por sus siglas en inglés “Remote Terminal Unit”) inalámbrica, que nos ayude a superar los inconvenientes del cableado en las redes con sensores de temperatura en los procesos de la agroindustria peruana. Específicamente en el tratamiento por calentamiento, más conocido como proceso hidrotérmico. Se busca tomar datos de temperatura medidos por sensores resistivos, los cuales serán transmitidos inalámbricamente utilizando la tecnología ZigBee, la cual cubre las necesidades para llevar a cabo este trabajo.

Para esta tesis, se tuvo que recurrir a herramientas y conocimientos de electrónica relacionados con redes de comunicación inalámbrica y microcontroladores, eligiendo el tipo de tecnología que se ajuste a las necesidades del caso. En los últimos años se ha generado un gran incremento en la demanda de servicios inalámbricos, debido a que son flexibles, permiten rapidez en la instalación y facilidad para reubicar las instalaciones de trabajo, evitando la necesidad de realizar conexión física. En consecuencia estos sistemas de comunicación tienen un enorme desarrollo, dando lugar a nuevas tecnologías así como a novedosas aplicaciones.

Con esta tesis también se busca contribuir a la familiarización de los usuarios con este tipo de tecnología, teniendo así nuevas perspectivas de cómo afrontar los distintos problemas que se puedan presentar en el ámbito laboral; comprobando que esta tecnología es económica y competente.

Finalmente, quiero agradecer a todas las personas que han estado conmigo brindándome su apoyo e incitándome a seguir y poder desarrollar esta tesis. A mi asesor, Dr. Ing. Justo Oquelis Cabredo por sus consejos, incitándome siempre a organizarme y mejorar, por su apoyo incondicional. A mi familia, quienes siempre han sido un motivo de seguir mejorando, inculcándome la perseverancia y dándome las fuerzas necesarias para culminar esta tesis. Y a mis amigos, con quienes siempre hemos compartido momentos realmente memorables.

Resumen

El crecimiento constante de los mercados e industrias, elevan el nivel de competencia entre ellas, logrando que hoy en día las nuevas tecnologías nos mantengan pendientes de los nuevos avances, los cuales nos ayuden a ser más competentes. Siendo la comunicación inalámbrica quien ha tenido el mayor beneficio de esta evolución tecnológica.

El estudio para la “Implementación de RTU inalámbrica usando ZigBee”, busca obtener una solución tecnológica propia para optimizar el envío de temperaturas del proceso hidrotérmico que actualmente se hace mediante cables (siendo estos de un costo elevado y de difícil interconexión), no permitiendo flexibilidad en la movilidad, además que el registro solo se puede realizar desde un solo punto. Al implementar este sistema, las limitaciones de control y supervisión del proceso serían menores.

La tesis se desarrolla en cinco capítulos. El primer capítulo, nos muestra un poco sobre la historia de las redes inalámbricas, tipos de tecnologías existentes a manera de ubicarnos en este tema, también se habla sobre sensores de temperatura resistivos y microcontroladores. El segundo capítulo de esta tesis nos introduce y explica sobre el estándar y dispositivo usado para transmitir los datos inalámbricamente en este caso ZigBee. En el tercer capítulo se plantea el problema que se pretende resolver y la solución propuesta, para poder mejorar la transmisión evitando el excesivo cableado e interferencia electromagnética con el que se trabaja actualmente en la agroindustria. En el cuarto y quinto capítulo veremos lo relacionado con el hardware y software implementados para el desarrollo de esta tesis.

Por último se presentarán las conclusiones del trabajo, en las cuales, podremos tener una síntesis de los aspectos más importantes a tener en cuenta al momento de la implementación de una mejora inalámbrica como la estudiada en esta tesis, además habrán algunas recomendaciones para mejoras.

La implementación de la solución propuesta mejorará el proceso en cuestión de forma considerable, dándole mayor dinamismo en la toma y transmisión de temperaturas.

Índice

Introducción	1
Capítulo I. Generalidades	3
1.1. Evolución de las redes inalámbricas.....	3
1.1.1. Origen de la comunicación inalámbrica.....	3
1.1.2. Primera red local inalámbrica.....	4
1.2. Tipos de redes inalámbricas.....	6
1.2.1. WPAN (Wireless Personal Area Network)	7
1.2.2. WLAN (Wireless Local Area Network)	8
1.2.3. WMAN (Wireless Metropolitan Area Network, Wireless, MAN)	9
1.2.4. WWAN(Wireless Wide Area Network, Wireless, WAN).....	9
1.3. Tipos de ondas.....	10
1.3.1. Ondas de radio.....	11
1.3.2. Microondas.....	11
1.3.2.1. Microondas terrestres.....	12
1.3.2.2. Microondas por satélite.....	13
1.3.3. Infrarrojos.....	15
1.4. Tecnologías de comunicación inalámbrica.....	15
1.4.1. ZigBee.....	16

1.4.2. Bluetooth.....	17
1.4.3. Wi-Fi.....	18
1.4.4. Wireless Messaging API (WMA)	19
1.4.5. GSM (Sistema global de comunicaciones móviles).....	20
1.4.6. UMTS (Sistema universal de telecomunicaciones móviles).....	21
1.4.7. GPRS (Servicio de radiotransmisión de paquetes generales).....	22
1.5. Protocolos de comunicación inalámbrica.....	24
1.6. Ventajas y desventajas de las redes inalámbricas.....	26
1.7. Microcontroladores.....	27
1.7.1. Características Generales.....	28
1.7.2. Gamas de los microcontroladores.....	28
1.7.2.1. La gama baja.....	28
1.7.2.2. La gama media.....	29
1.7.2.3. La gama alta.....	29
1.8. Sensores de Temperatura Resistivos (RTD).....	30
1.8.1. Características de los metales.....	30
1.8.1.1. Material de los sensores.....	30
1.8.1.2. Curvas Características.....	31
1.8.2. Tipos de sensores.....	33
1.8.3. Acondicionamiento de la señal.....	35
1.8.4. Aplicaciones.....	37
Capítulo II. Protocolo de comunicación inalámbrica.....	39
2.1. Protocolo ZigBee.....	39
2.1.1. Introducción al protocolo.....	39
2.1.2. Definición.....	40
2.1.3. Estructura.....	41
2.1.4. Características.....	43
2.1.5. Aplicaciones.....	44
2.1.6. Circuito básico para el XBee.....	46
2.1.7. Dispositivos de una red ZigBee.....	47

2.1.7.1.	Coordinador ZigBee (ZC)	48
2.1.7.2.	Router ZigBee (ZR).....	50
2.1.7.3.	Dispositivo final (ZED)	51
2.1.8.	Topología.....	52
2.1.8.1.	Topología en Estrella.....	52
2.1.8.2.	Topología en Árbol (Cluster Tree)	53
2.1.8.3.	Topología en Mallas.....	54
2.1.9.	Seguridad.....	55
2.1.10.	Modo de Operación.....	56
2.1.10.1.	Modo Recibir/Transmitir.....	57
2.1.10.2.	Modo de Bajo Consumo (Sleep Mode).....	58
2.1.10.2.1.	Modo de sueño controlado por Pin.....	58
2.1.10.2.2.	Modos de sueños cíclicos.....	59
2.1.10.3.	Modo de Comando.....	59
2.1.10.4.	Modo Transporte.....	67
2.1.10.5.	Modo de Operación API.....	68
2.1.10.6.	Idle.....	69
2.1.11.	Técnica de modulación.....	69
 Capítulo III. Solución de la transmisión de temperatura en procesos hidrotérmicos.....		71
3.1.	Situación actual del proceso hidrotérmico en la agroindustria.....	71
3.1.1.	Principales problemas en las conexiones cableadas.....	72
3.2.	Solución propuesta para la transmisión de temperatura.....	76
3.2.1.	Optimización de la transmisión de datos en el proceso hidrotérmico.....	76
3.2.1.1.	Tarjeta acondicionadora de señal de 4 a 20 mA.....	78
3.2.1.2.	Tarjeta de Transmisión de datos.....	80
3.2.1.3.	Tarjeta de Recepción de datos.....	83
3.2.1.4.	Selección de módulo Xbee para realizar la transmisión de temperatura.....	86
 Capítulo IV. Descripción del hardware.....		89

4.1. Tarjeta de transmisión inalámbrica implementada.....	89
4.1.1. Etapa de Comunicación.....	89
4.1.2. Etapa de Alimentación.....	94
4.1.3. Etapa de Programación.....	95
4.1.4. Etapa de Transmisión.....	95
4.1.5. Lista de Componentes.....	95
4.2. Tarjeta de recepción inalámbrica implementada.....	96
4.2.1. Etapa de Comunicación.....	96
4.2.2. Etapa de Alimentación.....	99
4.2.3. Etapa de Recepción.....	100
4.2.4. Lista de Componentes.....	100
4.3. PIC16F873.....	100
4.3.1. Descripción del PIC16F873.....	101
4.3.2. Entradas y salidas digitales.....	102
4.3.3. Organización de memoria.....	103
4.3.3.1. Memoria de datos (RAM).....	104
4.3.4. Puertos de entrada y salida.....	105
4.3.4.1. Puerto A y el registro TRISA.....	106
4.3.4.2. Puerto B y el registro TRISB.....	106
4.3.4.3. Puerto C y el registro TRISC.....	106
4.3.5. Convertidor Analógico Digital.....	106
4.3.6. Especificaciones del PIC16F873.....	111
4.3.6.1. Características mecánicas.....	111
4.3.6.2. Características eléctricas.....	112
4.4. Modulo Xbee.....	113
4.4.1. Características.....	113
4.4.2. Entradas y salidas digitales.....	114
4.4.3. Especificaciones del módulo Xbee.....	115
4.4.3.1. Características mecánicas.....	115
4.4.3.1.1. Consideración de montaje.....	117
4.4.3.2. Características eléctricas.....	118

4.4.3.3.	Características técnicas.....	119
Capítulo V.	Descripción del software.....	121
5.1.	MPLAB X.....	121
5.1.1.	Acerca de MPLAB X.....	121
5.1.2.	Funciones del MPLAB X.....	122
5.1.3.	Programación implementada.....	122
5.1.3.1.	Definición de los parámetros utilizados.....	122
5.1.3.2.	Definición de los sub programas utilizados.....	122
5.1.3.3.	Definición de los caracteres para el envío de datos.....	123
5.1.3.4.	Programa principal.....	123
5.2.	X-CTU.....	124
5.2.1.	Acerca de X-CTU.....	124
5.2.2.	Funciones del X-CTU.....	124
5.2.3.	Configuración del módulo XBee.....	124
5.2.3.1.	Grabación del Firmware.....	124
5.2.3.2.	Configuración del módulo XBee como coordinador.....	125
5.2.3.3.	Configuración del módulo XBee como end device.....	127
5.3.	Visual Basic 6.0.....	129
5.3.1.	Acerca de Visual Basic 6.0.....	129
5.3.2.	Funciones del Visual Basic 6.0.....	129
5.3.3.	Programa Implementado.....	129
5.3.3.1.	Interfaz gráfico.....	130
5.3.3.2.	Código Implementado.....	130
Conclusiones.....		133
Bibliografía.....		135
Anexo I	Fotografías de los elementos implementados	
Anexo II	Guía rápida para el X-CTU	

Anexo III	Visual Basic
Anexo IV	Código implementado
Anexo IV	Esquemáticos y circuitos impresos
Anexo V	Resultados obtenidos

Introducción

Las conexiones inalámbricas, actualmente constituyen una eficaz y poderosa herramienta que permite la transferencia de datos y comunicación sin la necesidad de cables. De esta manera se establece la conexión, dando movilidad y flexibilidad al sistema con el que se trabaja, ayudando a solucionar problemas que se generan a diario en los entornos industriales.

Para alcanzar el objetivo de esta tesis, se analizaron los principales protocolos de comunicación inalámbrica comprendiendo sus ventajas, desventajas y aplicaciones. Como resultado del análisis se selecciono uno de los protocolos por considerarlo adecuado para el entorno industrial; el cual nos ofrece una alternativa para solucionar el problema planteado, siendo este transmitir medidas de temperatura de manera inalámbrica, segura y eficiente.

El Capítulo I nos da una visión general de la evolución de las redes inalámbricas, las ventajas que proporcionan, así como el tipo de tecnologías con sus respectivas características, ayudándonos a entender la elección como opción de desarrollo. Así también se realiza un estudio general sobre microcontroladores y sobre los sensores de temperatura resistivos.

En el Capítulo II hacemos un estudio más profundo sobre el protocolo de comunicación que usaremos para la transmisión de datos con el cual se realizara la implementación de nuestra RTU inalámbrica.

En el Capítulo III se expone la situación actual de los procesos hidrotérmicos en la agroindustria del país. Así también se presenta la solución para poder transmitir la información de manera inalámbrica por medio de tecnología electrónica; además mencionamos algunas soluciones alternativas para las medidas de temperatura.

En el Capítulo IV y Capítulo V se exponen todo el Software como el Hardware que debieron ser implementados para poder llevar a cabo el desarrollo físico de los módulos de transmisión y recepción inalámbrica.

Capítulo I

Generalidades

1.1. Evolución de las redes inalámbricas

En la comunicación inalámbrica no se encuentra al emisor y receptor unidos por medio de conductores eléctricos, sino que se utiliza la modulación de ondas electromagnéticas a través del espacio, por lo tanto este tipo de red carece de cables. En este sentido, los dispositivos físicos que ayudan a la comunicación sólo están presentes en los emisores y receptores de la señal como: computadoras, PDA, teléfonos, etc.

Una de las tecnologías más prometedoras y discutidas en esta década es la de poder transmitir datos mediante tecnología inalámbrica. Este tema de transmisión y comunicación inalámbrica (además de sus diferentes formas de hacerlo) está siendo ampliamente investigado.

En los últimos años las redes inalámbricas han ganado mucha popularidad, que se ve acrecentada conforme a sus prestaciones aumentan y se descubren nuevas aplicaciones para ellas. La aparición de las redes inalámbricas ofrece muchas ventajas (compatibilidad con las redes cableadas ya existentes, la facilidad de instalación, la reducción en los costos, la sencillez de administración, la capacidad de atravesar barreras físicas, etc.).

1.1.1. Orígenes de la comunicación inalámbrica

En 1880, Graham Bell y Summer Tainter inventaron el primer aparato de comunicación sin cables, el fonógrafo. El fonógrafo permitía la transmisión del sonido por medio de una emisión de luz, no teniendo mucho éxito debido a que en ese entonces aun no se distribuía la electricidad.

La Figura 1.1, nos muestra el funcionamiento del fotófono de una manera esquemática, usando la luz solar.

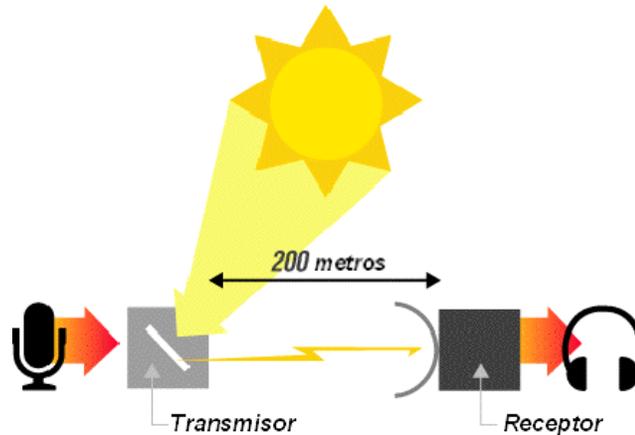


Figura 1.1. Esquema de funcionamiento de un fotófono

En 1888 el físico alemán Rudolf Hertz realizó la primera transmisión sin cables con ondas electromagnéticas mediante un oscilador que usó como emisor y un resonador¹ que hacía el papel de receptor. Seis años después las ondas de radio ya eran un medio de comunicación. En 1899 Guillermo Marconi consiguió establecer comunicaciones inalámbricas a través del canal de la Mancha, entre Dover y Wilmereux, y en 1907, se transmitían los primeros mensajes completos a través del Océano Atlántico. Durante la segunda guerra mundial se produjeron importantes avances en este campo.

1.1.2. Primera red local inalámbrica

No fue hasta 1971 cuando un grupo de investigadores bajo la dirección de Norman Abramson, en la Universidad de Hawai, crearon el primer sistema de comunicación de paquetes mediante una red de comunicación por radio, dicha red se llamo ALOHA. Ésta es la primera red de área local inalámbrica (WLAN²), estaba formada por 7 computadoras situadas en distintas islas que se podían comunicar con un ordenador central al cual pedían que realizara cálculos. Uno de los primeros problemas que tuvieron y que tiene todo nuevo tipo de red inventada fue el control de acceso al medio (MAC³), es decir, el protocolo a seguir para evitar que las distintas estaciones solapen sus mensajes entre sí. En un principio se solucionó haciendo que la estación central emitiera una señal intermitente en una frecuencia distinta a la del resto de computadoras mientras estuviera libre, de tal forma que cuando una de las

¹ Cualquier sistema capaz de entrar en resonancia o que tiene capacidad de comportarse de manera resonante.

² Wireless local area network.

³ Media Access control.

estaciones se disponía a transmitir, primero “escuchaba” y se cercioraba de que la central estaba emitiendo dicha señal para entonces enviar su mensaje, esto se conoce como CSMA⁴.

La Figura 1.2, nos representa la primera red local inalámbrica.

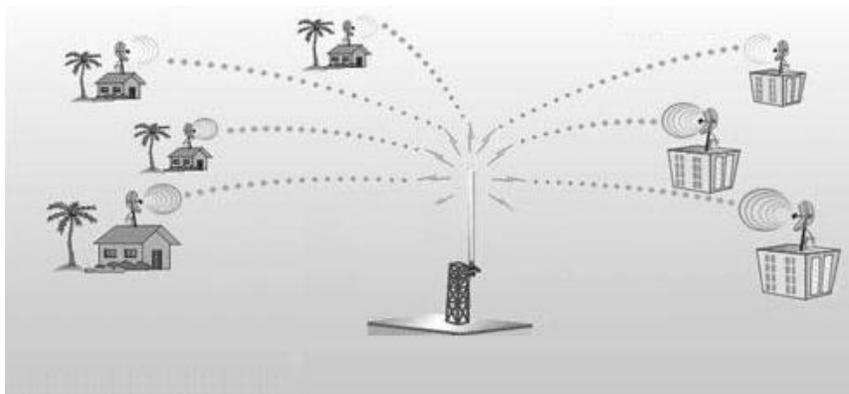


Figura 1.2. Red ALOHA

Un año después ALOHA se conectó mediante ARPANET al continente americano, ARPANET es una red de computadoras creada por el Departamento de Defensa de los EEUU como medio de comunicación para los diferentes organismos del país.

A finales de la década de los setenta se publicaron los resultados de un experimento consistente en utilizar enlaces infrarrojos para crear una red local en una fábrica suiza llevada a cabo por IBM⁵. La idea de los ingenieros era construir una red local en la fábrica. Los resultados se publicaron en el volumen 67 de los Proceedings del IEEE⁶ y se han considerado como el punto de partida en la línea evolutiva de las redes inalámbricas.

Las siguientes investigaciones se harían en laboratorios, siempre utilizando altas frecuencias, hasta que en 1985 la Federal Communication Commission (FCC, siendo la agencia federal de EEUU encargada de regular y administrar las telecomunicaciones) asigna una serie de bandas al uso de IMS (Industrial, Scientific and Medical).

Esta asignación se tradujo a una mayor actividad en la industria y la investigación de WLAN, la cual empezaba a enfocarse al mercado. Seis años más tarde en 1991, se publicaban los primeros trabajos de WLAN propiamente dicha, ya que según la norma IEEE 802 solo se considera WLAN a aquellas redes que transmitan al menos a 1 Mbps.

⁴ Carrier sense multiple Access, en español: acceso múltiple por detección de portada.

⁵ International business machines.

⁶ Institute of electrical and electronics engineers.

Aunque la red inalámbrica de alcance local ya existía, su introducción e implementación en el mercado a nivel doméstico y laboral aun se haría esperar unos años. Uno de los factores que supuso un gran empuje al desarrollo de este tipo de red fue el asentamiento de Laptops y PDA en el mercado, ya que este tipo de producto portátil reclamaba más la necesidad de una red sin ataduras, sin cables.

1.2. Tipos de redes inalámbricas

Los tipos de redes inalámbricas dependen de su alcance y tipo de onda electromagnética utilizada. A continuación realizaremos un detalle breve de los tipos de redes inalámbricas.

En la Figura 1.3, se muestra mediante un gráfico la clasificación de las redes inalámbricas, con algunos estándares utilizados.

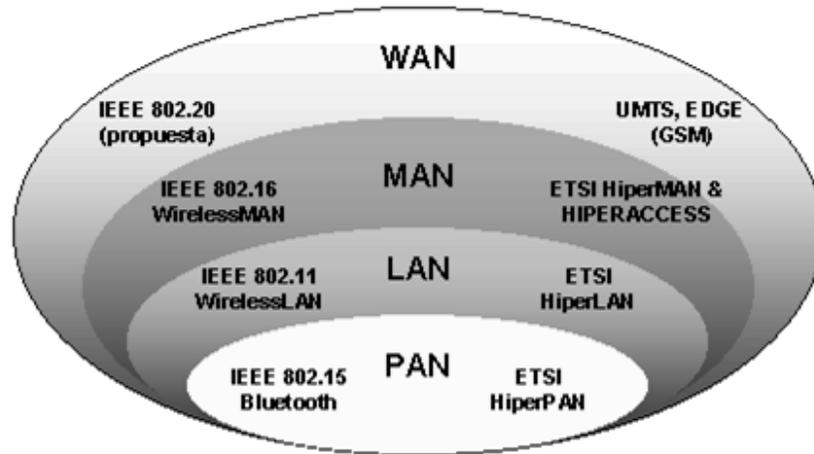


Figura 1.3. Clasificación de las redes inalámbricas

A continuación en la Tabla 1.1. se muestra los tipos de redes con algunas características que las definen.

Tabla 1.1. Características de las redes inalámbricas

	PAN	LAN	MAN	WAN
Estándar	802.15	802.11a, 11b, 11g, HiperLAN2	802.16 MMDS, LMDS	GSM, GPRS, CDMA, 2.5-3G
Rapidez	< 1 Mbps	1 to 54+ Mbps	22+ Mbps	10 to 384 Kbps
Rango	Corto	Mediano	Mediano – Largo	Largo

1.2.1. WPAN (Wireless Personal Area Network)

Red de área personal, es una red para la comunicación entre distintos dispositivos (tanto computadoras, puntos de acceso a internet, celulares, PDA, dispositivos de audio, impresoras, etc.) cercanos al punto de acceso, tienen una cobertura entre 1 y 10 metros.

En este tipo de red se utilizan tecnologías como HomeRF (estándar para conectar todos los teléfonos móviles de la casa y los ordenadores mediante un aparato central), Bluetooth (protocolo que sigue la especificación IEEE 802.15.1), ZigBee (basado en la especificación IEEE 802.15.4 y utilizado en aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con tasas bajas de transmisión de datos y maximización de la vida útil de sus baterías, bajo consumo) y RFID (sistema remoto de almacenamiento y recuperación de datos, con el propósito de transmitir la identidad de un objeto, similar a un número de serie único, mediante ondas de radio).

El PAN debe proporcionar una comunicación segura, que soporta diferentes aplicaciones y distintos escenarios de operación, de manera de abarcar gran variedad de dispositivos.

Los dispositivos que utiliza este tipo de red PAN, buscan prever los siguientes puntos para lograr su fácil escalabilidad: Funcionalidad y complejidad, precio, consumo de energía, soporte para las interfaces.

En la Figura 1.4, se muestra las posibles conexiones que se dan en este tipo de red inalámbrica.



Figura 1.4. Red inalámbrica de área personal

1.2.2. WLAN (Wireless Local Area Network)

Este sistema de comunicación de datos inalámbricos flexible tiene una cobertura de 100 a 500 metros aproximadamente, se utiliza mayormente como alternativa a las redes LAN cableadas o como extensión de éstas.

Utiliza tecnología de radiofrecuencia que permite mayor movilidad a los usuarios al minimizar las conexiones cableadas. Este tipo de red sigue adquiriendo importancia en muchos campos, en los que se transmite la información en tiempo real a una terminal central.

En este tipo de redes se pueden encontrar tecnologías basadas en HiperLAN (High Performance Radio LAN), o tecnologías basadas en Wi – Fi (Wireless Fidelity).

Ventajas:

- Movilidad: Información en tiempo real en cualquier lugar de la organización o empresa para todo usuario de la red. El que se obtenga en tiempo real supone mayor productividad y posibilidades de servicio.
- Facilidad de instalación y flexibilidad: Evita cables por muros y techos, además de llegar donde el cable no puede.
- Escalabilidad: El cambio de topología de red es sencillo y trata igual a pequeñas y grandes redes.

En la Figura 1.5, se muestra las posibles conexiones que se dan en las redes inalámbricas LAN.



Figura 1.5. Red inalámbrica de área local

1.2.3. WMAN (Wireless Metropolitan Area Network, Wireless, MAN)

Este tipo de red es la suma de muchas redes de área local interconectadas, también conocidas como bucle local inalámbrico (WLL, wireless local loop). Este tipo de red puede extenderse hasta un máximo de 50 km, permite transmitir inalámbricamente datos que, gracias a su ancho de banda, permite el despliegue de servicios fijos de voz, acceso a internet, comunicaciones de datos en redes privadas y video bajo demanda, entre varias ubicaciones dentro de un área metropolitana, sin el alto coste que supone la instalación de cables de fibra o cobre. WMAN utiliza ondas de radio o luz infrarroja para transmitir los datos.

La tecnología más popular que utiliza esta red es WiMax (Worldwide Interoperability for Microwave Access), un estándar de comunicación inalámbrica basado en la normal IEEE 802.16. Otro ejemplo es el LMDS (Local Multipoint Distribution Service).

En la Figura 1.6, se muestra las posibles conexiones que se dan en las redes inalámbricas MAN.

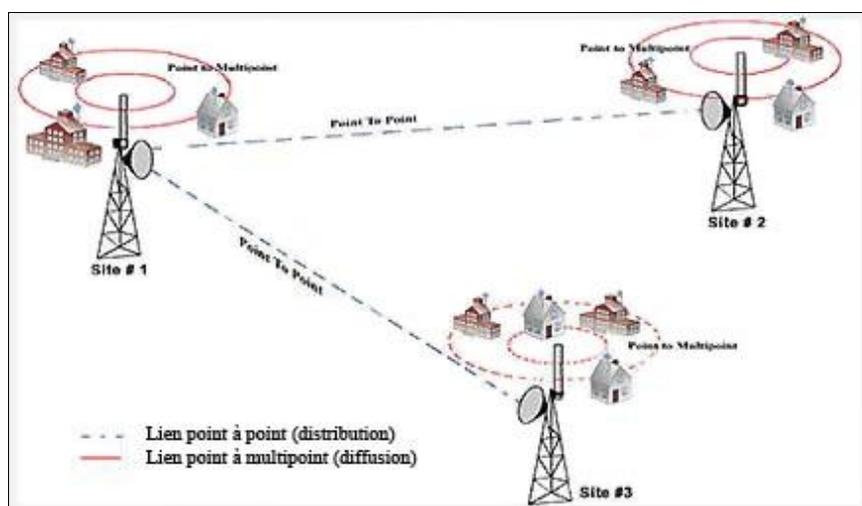


Figura 1.6. Red inalámbrica de área metropolitana

1.2.4. WWAN(Wireless Wide Area Network, Wireless, WAN)

Es una forma de red inalámbrica de área amplia, diferente a una red de área local por la tecnología utilizada para transmitir la señal y su tamaño. Esta red es utilizada para los teléfonos móviles de segunda y tercer generación (UMTS⁷) y para los móviles GPRS⁸ (tecnología digital).

⁷ Universal mobile telecommunications System.

⁸ General packet radio service.

Se da mediante un sistema de comunicación satelital, el cual está conformado por estaciones terrenas y por uno o varios satélites los cuales se encuentran en órbita alrededor de la tierra. La estación terrena, es una instalación diseñada para transmitir a un satélite o recibir señales de éste.

La estación terrena envía la información al satélite por medio de señales de alta frecuencia, el satélite recibe las señales y retransmite a la tierra en donde las estaciones terrenas que están dentro del área de cobertura conocida como “huella”, reciben la señal. La transmisión de la estación terrena hacia el satélite se conoce como “enlace ascendente”, mientras que la transmisión desde el satélite hacia la estación terrena se denomina “enlace descendente”.

Las características que se deben tener en cuenta en este tipo de comunicación son el retardo, el ruido y el ancho de banda limitado. Una ventaja de la utilización de este tipo de redes es que alcanza zonas geográficas remotas.

En la Figura 1.7, se muestra gráficamente las conexiones que se dan en las redes inalámbricas WWAN.

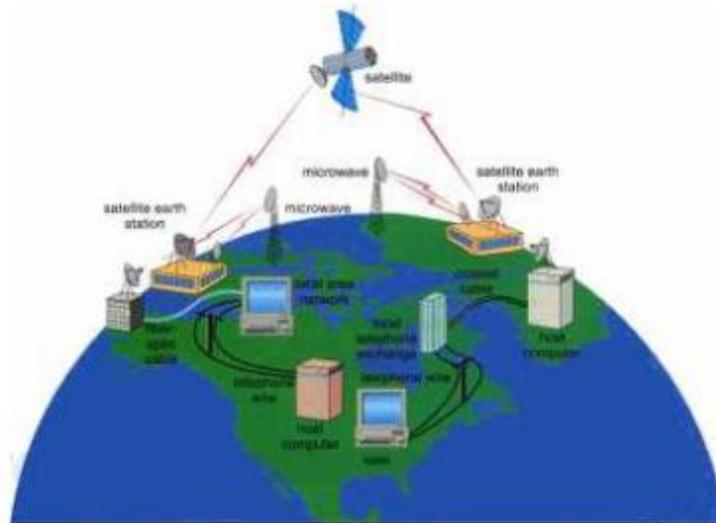


Figura 1.7. Red inalámbrica de área amplia

1.3. Tipos de Ondas

Una onda es una perturbación que se propaga de un punto a otro a través del espacio transportando energía. Existen ondas materiales (todas las ondas menos las electromagnéticas), las cuales necesitan un medio elástico para propagarse. Para el caso de la comunicación inalámbrica se usan las ondas electromagnéticas.

1.3.1. Ondas de radio

Las ondas de radio son un tipo de radiación electromagnética omnidireccionales, teniendo una longitud de onda (desde unos cuantos milímetros hasta alcanzar cientos de kilómetros) mayor que la luz visible (400 a 700 nanómetros, 5000 veces menos que la longitud de onda de radio), este tipo de onda se usa extensamente en las comunicaciones.

Las ondas de radio, no necesitan de parabólicas y no son sensibles a los cambios climáticos como la lluvia. Existen varios tipos de banda, se puede transmitir con una frecuencia de 3 a 30 Hz y un máximo de 300 a 3000 MHz.

Varias frecuencias de ondas de radio se usan para la televisión y emisiones de radio FM y AM, comunicaciones militares, teléfonos celulares, redes inalámbricas y otras numerosas aplicaciones de comunicaciones. La mayoría de estas ondas pasan libremente a través de la atmosfera de la Tierra. Sin embargo, algunas frecuencias pueden ser reflejadas o absorbidas por las partículas cargadas de la ionosfera.

En la Figura 1.8, se muestra los diferentes tipos de ondas de radio.

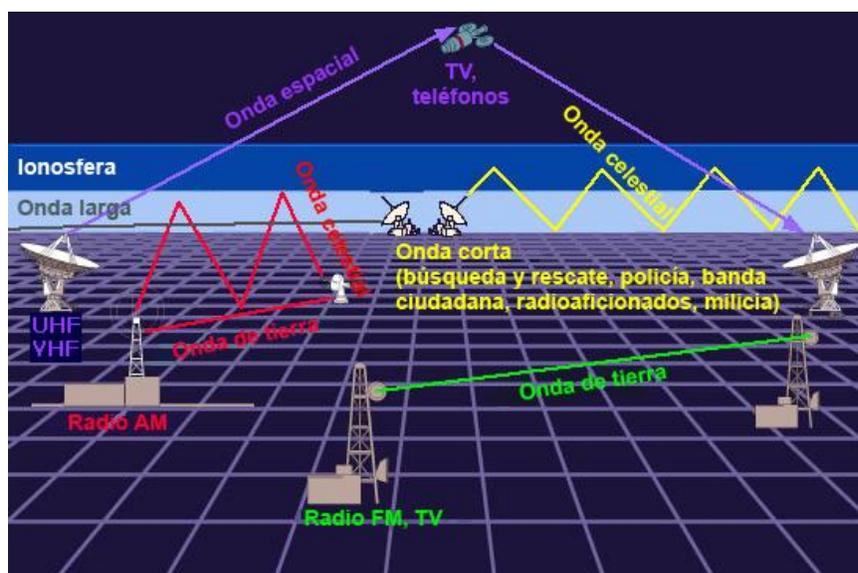


Figura 1.8. Tipos de ondas de radio

1.3.2. Microondas

Se denomina microondas a las ondas electromagnéticas definidas en un rango de frecuencia determinado; generalmente entre 300 MHz y 300 GHz, que supone un periodo de oscilación de 3 ns (3×10^{-9} s) a 3 ps (3×10^{-12} s) y una longitud de onda de rango de 1m a 1mm.

Otras definiciones, por ejemplo las de los estándares IEC⁹ 60050 y IEEE 100 sitúan su rango de frecuencia entre 1 GHz y 300 GHz, es decir, longitudes de onda entre 30 cm y 1 mm.

Dentro de sus aplicaciones una de las más conocidas es el horno microondas, usando un magnetrón para producir ondas a una frecuencia de aproximadamente 2.45 GHz, las cuales hacen vibrar o rotar las moléculas de agua generando calor.

También hay aplicación en telecomunicaciones, que usan radiodifusión debido a que pasan fácilmente a través de la atmosfera con menos interferencia que otras longitudes de onda mayores, teniendo las microondas un ancho de banda más grande que en el resto del espectro de radio. Se usa usualmente en programas informativos de televisión para transmitir desde una localización remota mediante una camioneta debidamente equipada. También se ve su influencia en aspectos militares, así como radares meteorológicos.

1.3.2.1. Microondas terrestres

Este tipo de microondas se basan en conexiones denominadas punto a punto, alcanzando kilómetros de distancia, pero emisor y receptor deben estar perfectamente alineadas y sin obstáculos físicos para evitar fallas en la transmisión. Su frecuencia es de 1 a 300 GHz, y la forma de onda emitida puede ser analógica (convencionalmente en FM) o digital.

Principales aplicaciones de un sistema microondas terrestre:

- Telefonía básica
- Datos
- Canales de TV.
- Video
- Telefonía celular

En la Figura 1.9, se representa como se ven las ondas terrestres, pudiendo ser: ondas directas y ondas reflejadas.

⁹ International Electrotechnical Commission.

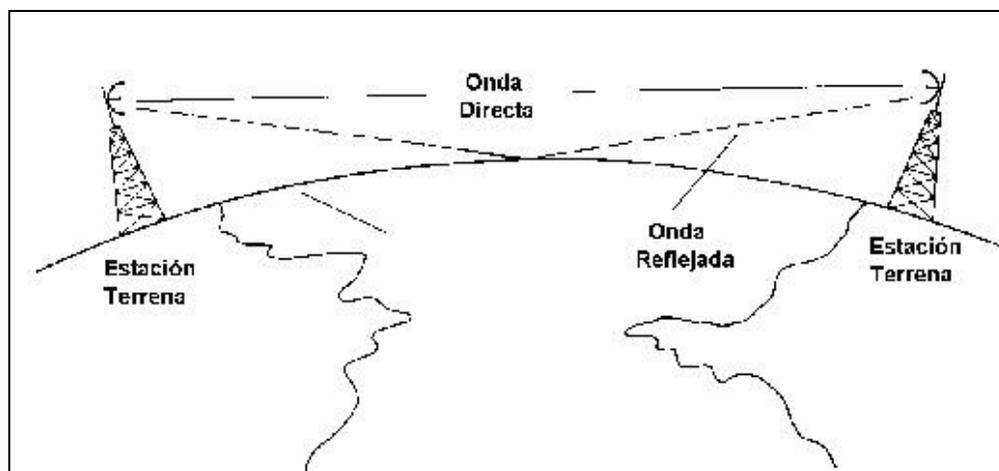


Figura 1.9. Microondas terrestres

Las licencias o permisos para operar enlaces de microondas pueden resultar un poco difíciles, ya que las autoridades deben asegurarse que ambos enlaces no causen interferencia a los enlaces ya existentes. El clima y el terreno son los mayores factores a considerar antes de instalar un sistema de microondas. Las consideraciones en terreno incluyen la ausencia de montañas o grandes cuerpos de agua las cuales pueden ocasionar reflexiones de multi-trayectorias.

1.3.2.2. Microondas por satellite

Se realiza a través de bases terrestres con antenas que envían señales al satélite, el cual se encarga de direccionar la señal hacia la estación receptora con la onda amplificadora para evitar pérdidas. La información que se reenvía de un satélite, es de las ondas más flexibles pero es fácil que sufra interferencias.

Un satélite actúa como repetidor. Un transpondedor¹⁰ recibe la señal de un transmisor, luego la amplifica y la retransmite hacia la tierra a una frecuencia diferente. Debe notarse que la estación terrena transmisora envía a un solo satélite, sin embargo, el satélite envía a cualquiera de las estaciones terrenas receptoras en su área de cobertura o huella (footprint).

En la Figura 1.10, se intenta representar el área de cobertura de un satélite geostacionario.

¹⁰ Transpondedor o transponder, es un tipo de dispositivo utilizado en telecomunicaciones cuyo nombre viene de la fusión de las palabras inglesas "Transmitter"(transmisor) y "Responder"(contestador/respondedor).

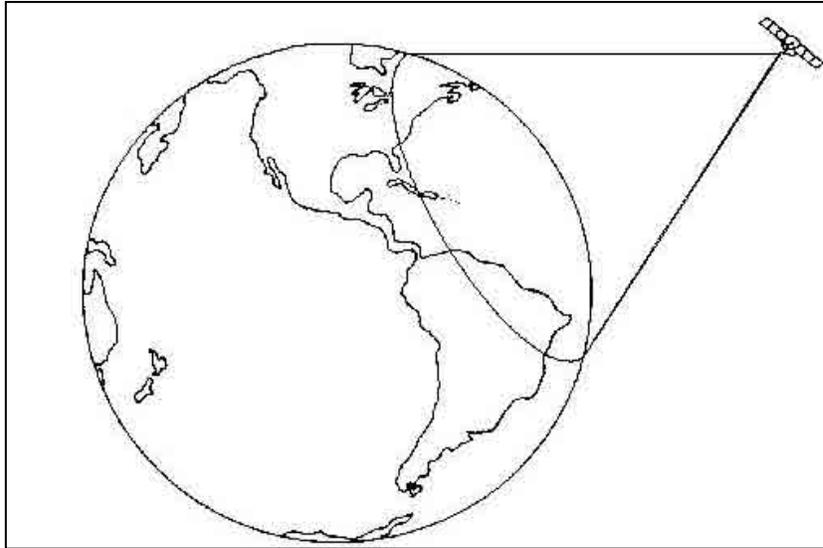


Figura 1.10. Cobertura de un satélite geostacionario

Los beneficios de la comunicación por satélite desde el punto de vista de comunicaciones de datos podrían ser los siguientes:

- Transferencia de información a altas velocidades (Kbps, Mbps).
- Ideal para comunicaciones en puntos distantes y no fácilmente accesibles geográficamente.
- Ideal en servicios de acceso múltiple a un gran número de puntos.
- Permite establecer la comunicación entre dos usuarios distantes con la posibilidad de evitar las redes públicas telefónicas.

Entre las desventajas de la comunicación por satélite están las siguientes:

- 1/4 de segundo de tiempo de propagación (retardo).
- Sensibilidad a efectos atmosféricos.
- Sensibles a eclipses.
- Falla del satélite (no es muy común).
- Requieren transmitir a mucha potencia.
- Posibilidad de interrupción por cuestiones de estrategia militar.

Los satélites de órbita baja (Low Earth Orbit; LEO) ofrecen otras alternativas que los satélites geostacionarios (Geosynchronous Earth Orbit; GEO), los cuales giran alrededor de la tierra a más de 3218.68 km. Los satélites de este tipo proveen comunicaciones de datos a baja velocidad y no son capaces de manipular voz, señales de video o datos a altas velocidades. Pero tienen las ventajas que los satélites GEO no tienen. Por ejemplo, no existe retardo en las transmisiones, son menos sensibles a factores atmosféricos, y transmiten a muy poca potencia. Estos satélites operan a frecuencias asignadas entre los 1.545 GHz y los 1.645 GHz.

1.3.3. Infrarrojo

Es una tecnología de transmisión inalámbrica por medio de ondas de calor, teniendo una capacidad de alcance de varios kilómetros aunque en la actualidad sus aplicaciones se realicen a distancias menores de 1 kilómetro; capaces de traspasar cristales pero no paredes, deben estar alineadas directamente y tienen una frecuencia de 300 GHz a 384 THz.

Tiene una velocidad promedio de transmisión de datos hasta de 1.5 Mbps (Megabits por segundo), no utiliza ningún tipo de antena, sino un diodo emisor, semejante al del control remoto para televisión. Se usan este tipo de transmisores en infrarrojo cuando la instalación de cable no es factible entre ambos sitios a conectar.

Una de sus ventajas es que no es necesario solicitar permiso ante las autoridades para utilizar esta tecnología. Se debe tener en cuenta al instalar, que los haces de luz pueden dañar el ojo humano.

En la Figura 1.11, se muestra LANs conectadas vía infrarrojo.

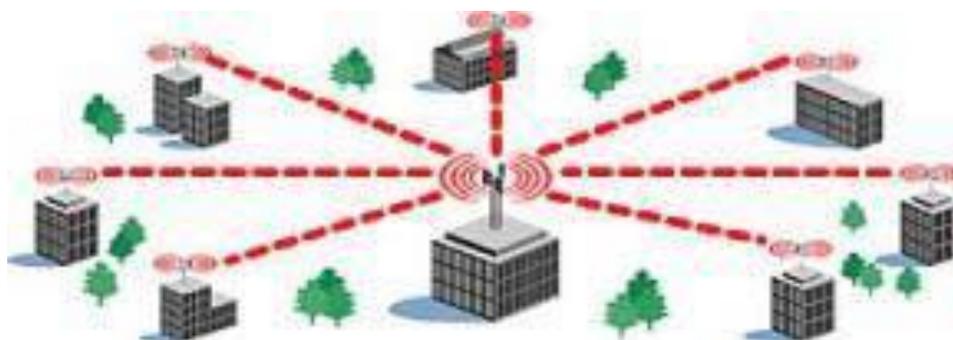


Figura 1.11. Conexión infrarroja en corta distancia

1.4. Tecnologías de comunicación inalámbrica

Las tecnologías inalámbricas han adoptado con el paso del tiempo una manera más sencilla y cómoda de utilizar toda clase de dispositivos con el fin de mejorar el confort y las comunicaciones en general.

Este tipo de tecnologías se encuentran en continuo crecimiento. Logrando comunicar una serie de dispositivos, haciendo que trabajen más eficientemente entre sí.

1.4.1. ZigBee

ZigBee, basado en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal (WPAN) que por su poca introducción al mercado no es muy conocida a pesar de que no es muy reciente. Utiliza la banda ISM para usos industriales, científicos y médicos (2.4 GHz). Los protocolos ZigBee se utilizan para realizar control industrial, albergar sensores empotrados, recolectar datos médicos, ejercer labores de detección de humo e intrusos, etc.

Es un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica para su utilización con radiodifusión digital de bajo consumo, ZigBee comunica una serie de dispositivos haciendo que trabajen más eficientemente entre sí (computadoras, puntos de acceso a internet, teléfonos celulares, PDA, dispositivos de audio, impresoras, etc.).

Es un transceptor¹¹ que usa baja potencia para trabajar, se usan para comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías. Una de sus típicas aplicaciones es la domótica¹² la cual consiste en el conjunto de sistemas capaces de automatizar una vivienda es decir la integración de la tecnología en el diseño inteligente de una vivienda. La razón de ellos son diversas características que lo diferencian de otras tecnologías: Bajo consumo, su topología de red en malla, su fácil integración (se puede fabricar nodos con muy poca electrónica).

Esta tecnología se ha desarrollado para satisfacer la creciente demanda de capacidad de red inalámbrica entre varios dispositivos de baja potencia. En la industria ZigBee, se está utilizando para la próxima generación de fabricación automatizada, con pequeños transmisores en cada dispositivo, lo que permite la comunicación entre dispositivos a una computadora central.

Para llevar a cabo este sistema, un grupo de trabajo llamado Alianza ZigBee (ZigBee Alliance) formado por varias industrias, sin fines de lucro, la mayoría de ellas fabricantes de semiconductores, han desarrollando el estándar. La alianza de empresas trabaja codo con codo con IEEE para asegurar una integración, completa y operativa. Esta alianza en las cuales destacan empresas como Invensys, Mitsubishi, Philips y Motorola trabajan para crear un sistema estándar de comunicaciones, vía radio bidireccional, para usarlo dentro de dispositivos de automatización de hogares (domótica), de edificios (inmótica), control industrial, periféricos de PC y sensores médicos. Los miembros de esta alianza justifican el desarrollo de este estándar para cubrir el vacío que se produce por otro tipo de tecnologías inalámbricas.

En la actualidad se siguen desarrollando más y más dispositivos que nos puedan ayudar y facilitar muchas tareas en nuestra vida diaria ya sea en nuestro hogar, en el trabajo o en todo nuestro entorno de desarrollo. También previsto esto y debido al incremento de tecnologías, siendo ZigBee Alliance un conjunto estandarizado de soluciones, que crea un protocolo de comunicaciones para que así cualquier compañía e independientes puedan desarrollar tecnología que tengan a "ZIGBEE" como estándar de comunicaciones.

¹¹ En telecomunicaciones, se aplica este término a dispositivos que funcionan tanto como transmisor y receptor.

¹² Aplicaciones electrónicas o informáticas con objetivo de mejorar las condiciones de habitabilidad.

ZigBee es diferente de otros estándares inalámbricos en el sentido de que ha sido diseñado para servir a un mercado diverso de aplicaciones que requieren bajo costo, baja potencia y seguridad en la conectividad y disponibilidad. El estándar se enfoca en la baja transmisión de datos, bajo ciclo de conectividad, y a un segmento del mercado no atendido bien por los estándares existentes. La razón para promover un nuevo protocolo como estándar es permitir la interoperabilidad entre dispositivos fabricados por diferentes empresas. En contraposición con otras tecnologías y estándares similares, ZigBee fue desarrollado para poder crear grandes redes de sensores.

En la Figura 1.12, se muestra los distintos campos en los cuales se puede tener la presencia de la tecnología ZigBee.

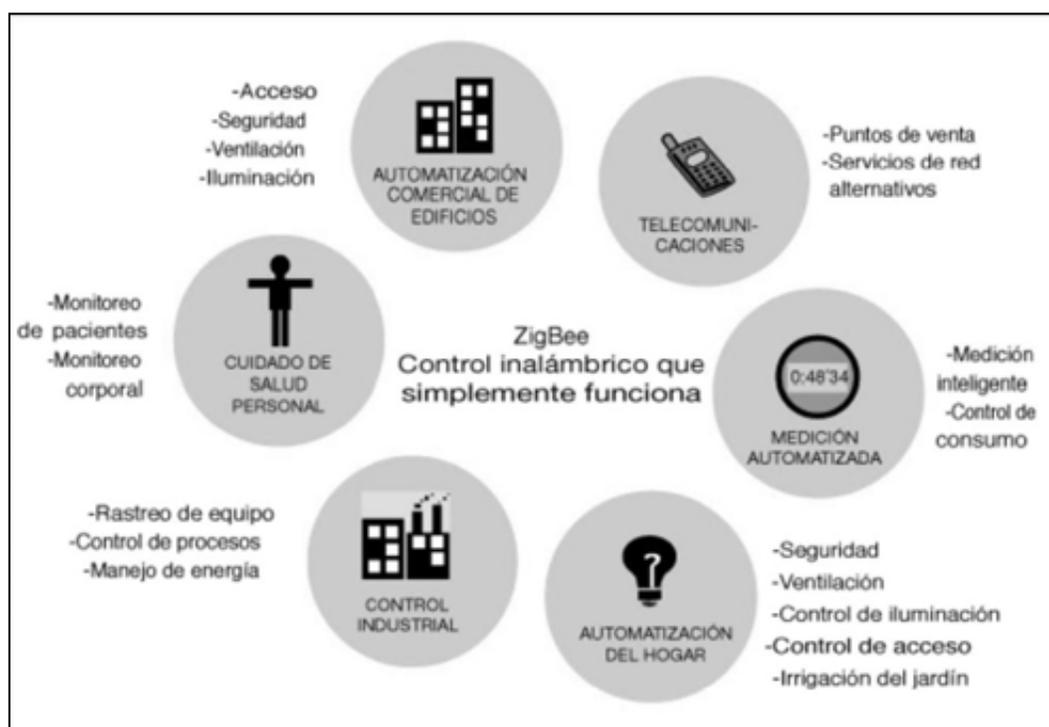


Figura 1.12. Campos de aplicación de ZigBee

1.4.2. Bluetooth

Es una tecnología global de transmisión inalámbrica, de bajo costo, potencia y tamaño pequeño, por medio de ondas de radiofrecuencia en la banda ISM de los 2.4 GHz de corto alcance (1.2 y 100 m a la redonda dependiendo la versión); se usan para redes de área personal (WPANs). Las ondas incluso pueden ser capaces de cruzar cierto tipo de materiales, incluyendo muros, lo cual permite que los dispositivos no estén alineados e incluso en la misma habitación.

No es necesario el uso de antenas externas visibles, sino que pueden estar integradas dentro del mismo dispositivo. Este tipo de transmisión se encuentra estandarizada de manera independiente y permite una velocidad de transmisión de hasta 1 Mbps. Para su uso es necesario que los dispositivos dispongan de un emisor integrado o agregado para este tipo de redes.

Estos dispositivos se clasifican según su potencia de transmisión en: Clase 1, Clase 2 o Clase 3, siendo totalmente compatibles los dispositivos de una clase con las otras.

Tabla 1.2. Clasificación de dispositivos bluetooth según su potencia de transmisión

Clase	Potencia máxima permitida (mW)	Potencia máxima permitida (dBm)	Rango (aproximado)
Clase 1	100mW	20dBm	~100 metros
Clase 2	2.5mW	4dBm	~25 metros
Clase 3	1mW	0dBm	~1 metro

1.4.3. Wi-Fi

Es una marca de la Wi-Fi Alliance, la cual es una organización comercial que adopta, prueba y certifica que los equipos cumplan con la normativa o estándares vigentes; si el dispositivo en cuestión cumple con los requerimientos de certificación, puede llevar el característico logo con el que asociamos a las redes de este tipo, las cuales tienen los estándares 802.11 relacionado a redes inalámbricas de área local.

La norma IEEE 802.11 sustituye el equivalente a las capas físicas y MAC de la norma 802.3 (Ethernet), en otras palabras la diferencia entre una red Wi-Fi de una Ethernet es cómo se transmiten las tramas o paquetes de datos; el resto es idéntico. Por tanto, una red local inalámbrica 802.11 es completamente compatible con todos los servidores de las redes locales (LAN) de cable 802.3 (Ethernet).

La familia de estándares 802.11 ha ido evolucionando desde su creación, mejorando el rango y velocidades de la transferencia de información, entre otras cosas. Existen diversos tipos de Wi-Fi, basado cada uno de ellos en un estándar aprobado, los cuales son: estándar IEEE 802.11b, IEEE 802.11g e IEEE 802.11n, estos tienen una aceptación internacional debido a su banda de 2.4 GHz, con una velocidad de hasta 11 Mbps, 54 Mbps y 300 Mbps, respectivamente.

Actualmente también se maneja el estándar IEEE 802.11a, conocido como WIFI 5 porque opera en la banda de 5 Ghz, debido a que opera en esta banda, disfruta de operatividad con canales relativamente limpios, existiendo muy poca interferencia ya que no existen otras tecnologías (Bluetooth, microondas, ZigBee, WUSB, etc.) que usen esa banda. Debido a su mayor frecuencia, su alcance es menor al de los estándares que trabajan a 2.4 GHz.

Ventajas:

- Ofrecen mayor comodidad frente a las redes cableadas.
- Una vez configuradas, las redes Wi-Fi permiten el acceso de múltiples ordenadores sin ningún problema.
- Existe compatibilidad total entre dispositivos de la marca Wi-Fi.

Desventajas:

- Tiene una menor velocidad en comparación a las conexiones cableadas, esto debido a las interferencias y pérdidas de señal que el ambiente puede acarrear.
- Existe una desventaja en el campo de la seguridad.
- Esta tecnología no es compatible con otros tipos de conexiones sin cables como Bluetooth, GPRS, UNMTS, etc.

En la Figura 1.13, se muestra distintos tipos de comunicación que se pueden dar mediante la tecnología Wi-Fi.

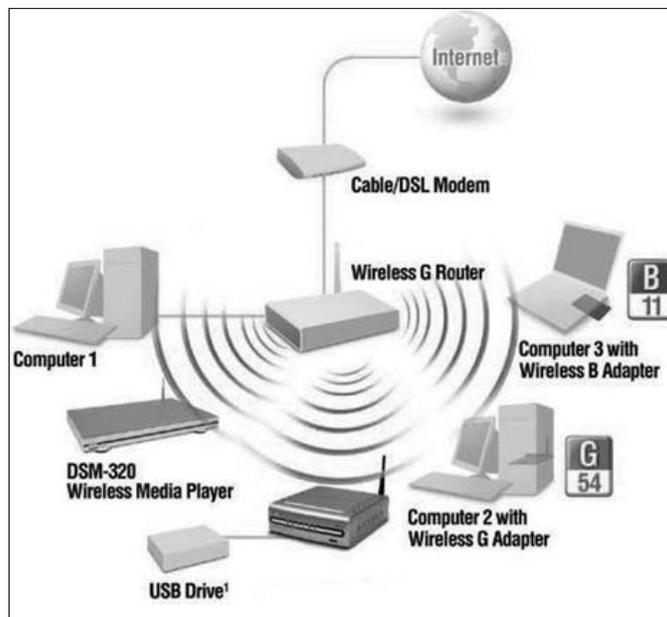


Figura 1.13. Esquema de una red Wi-Fi

1.4.4. Wireless Messaging API (WMA)

Provee una interface común que puede ser utilizado para habilitar una aplicación basada en Mobile Information Device Profile (MIDP) para el envío, la recepción y la gestión de mensajes cortos de texto y mensajes binarios, así como mensajes multimedia.

WMA apunta a teléfonos celulares y otros dispositivos que pueden enviar y recibir mensajes en forma inalámbrica. Es un API¹³ genérico para envío no solamente de mensajes binarios o de texto sino mensajes multipartes, generalmente usado para transmisión de mensajes multimedia.

Todos los componentes del WMA están contenidos en un solo paquete: `javax.wireless.messaging`, el cual define todas las interfaces para envío y recepción inalámbrica de mensajes de texto y binario.

1.4.5. GSM (Sistema global de comunicaciones móviles)

Es un sistema de espectro expandido basado en la división de tiempo en combinación con salto de frecuencias y surge de la necesidad de crear un estándar que ofrezca alta movilidad, establecer compatibilidad con la evolución hacia la digitalización, bajos costos de implementación y convergencia de varias aplicaciones.

GSM es un sistema estándar para la comunicación mediante teléfonos móviles que incorporan tecnología digital. Por ser digital cualquier cliente de GSM puede conectarse a través de su teléfono con su computador y puede enviar y recibir mensajes por e-mail, faxes, navegar por internet, acceso seguro a la red informática de una compañía (LAN/ Internet), así como utilizar otras funciones digitales de transmisión de datos, incluyendo el Servicio de Mensajes Cortos (SMS) o mensajes de texto.

El estándar GSM ha sido una ventaja para los consumidores que pueden beneficiarse de la capacidad de vagar y cambiar de proveedor sin sustitución de los teléfonos y también a los operadores de red, que puede elegir el equipo de muchos proveedores de equipos GSM

Existen comando AT, las cuales son instrucciones codificada que forman un lenguaje de comunicación entre el hombre y un terminal MODEM. Los comandos AT fueron desarrollados en 1977 por Dennis Hayes como un interfaz de comunicación con un MODEM para así poder configurarlo y proporcionarlo instrucciones, tales como marcar un número de teléfono, hacer llamadas de datos o de voz, leer y escribir en la agenda de contactos y enviar SMS, además de muchas otras opciones de configuración del terminal.

Las redes de telefonía móvil se basan en el concepto de celdas, es decir zonas circulares que se superponen para cubrir áreas geográficas. Las redes celulares se basan en el uso de un transmisor-receptor central en cada celda denominado "estación base" (o estación base transeptora "BTS"). Cuanto menor sea el radio de una celda, mayor será el ancho de banda disponible, en zonas urbanas muy pobladas, hay celdas con un radio de cientos de metros, mientras que en zonas rurales hay celdas de hasta 30 kilómetros.

En una red GSM, la terminal del usuario se llama estación móvil. Una estación móvil está constituida por una tarjeta SIM (módulo de identificación de abonado), que permite

¹³ Application Programming Interface.

identificar de manera única al usuario y a la terminal móvil, o sea, al dispositivo del usuario (normalmente un teléfono portátil). La tarjeta SIM permite identificar a cada usuario independientemente del dispositivo utilizado durante la comunicación con la estación base; la comunicación entre una estación móvil y una estación base se producen a través de un vínculo de radio, por lo general denominado interfaz de aire.

Todas las estaciones base de una red celular están conectadas a un controlador de estaciones base (BSC), que administra la distribución de los recursos; los BSC están físicamente conectados al centro de comunicación móvil (MSC) el cual los conecta con la red de telefonía pública y con internet.

En la Figura 1.14, se muestra gráficamente la arquitectura de la red de un sistema global de comunicaciones móviles (GSM).

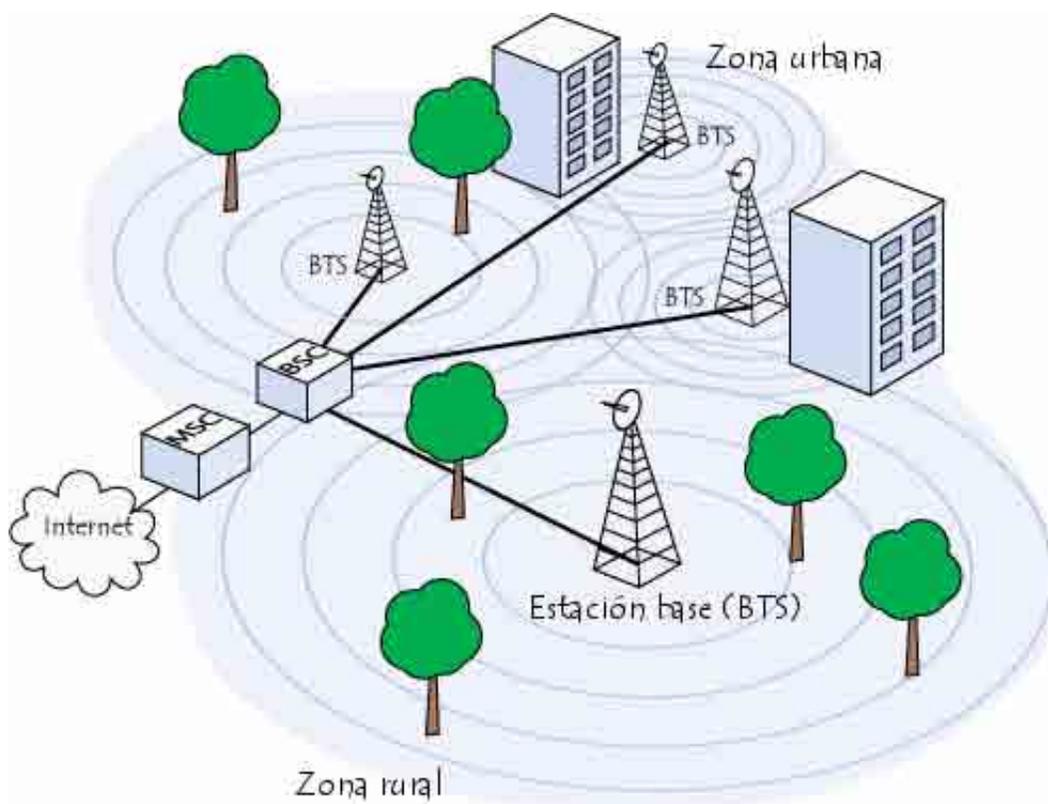


Figura 1.14. Arquitectura de la red GSM

1.4.6. UMTS (Sistema universal de telecomunicaciones móviles)

Es el estándar que se emplea en la llamada tercera generación de telefonía móvil, que permite disponer de banda ancha y transmitir un volumen de datos importantes para la red.

Con la tercera generación es posible la videoconferencia, descargar videos, el intercambio de postales electrónicas, paseos virtuales, etc. todo desde el móvil.

Es un sistema móvil digital multiaplicación, multifunción y multiservicio, que ofrecerá comunicaciones personales de alta capacidad y calidad, con soporte de roaming¹⁴ universal y servicios multimedia de banda ancha. Básicamente, se trata de una red de datos sobre IP que, con una tasa de transferencia de hasta 2 Mbps, permitirá la transmisión en tiempo real de voz, datos, imágenes, y videos, entre terminales fijos y móviles de reducido tamaño y sencillo manejo. UMTS supondrá por ejemplo que se pueda estar viendo a la persona con la que se está hablando como si se estuviera delante, o los conductores accedan a información sobre el tráfico y mapas de carreteras para evitar atascos y seguir el trayecto más corto.

Es una de las tecnologías usadas por móviles de tercera generación (3G, también llamada W-CDMA). Aunque inicialmente esté pensando para su uso en teléfonos móviles, la red UMTS no está limitada a estos dispositivos, pudiendo ser utilizados por otros.

En la Figura 1.15, se muestra el campo de actuación de la tecnología UMTS.

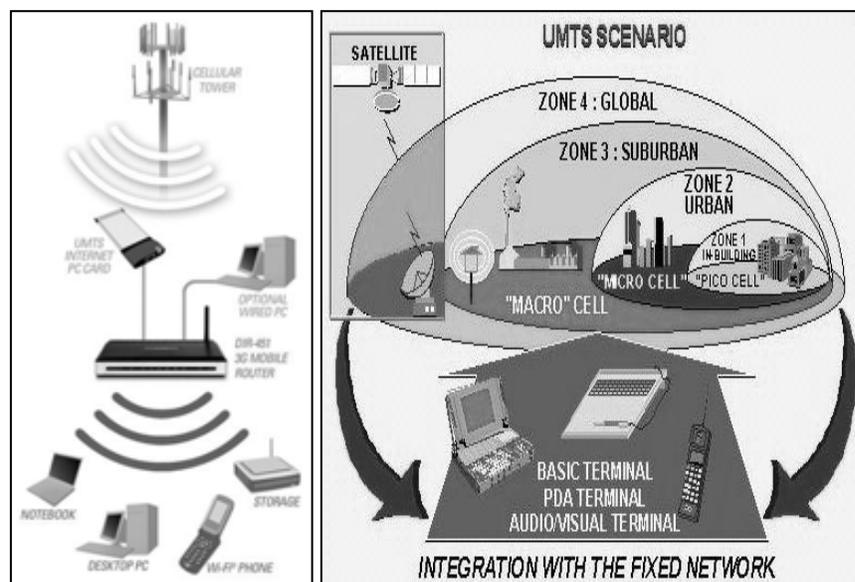


Figura 1.15. Campo de actuación de sistema UMTS.

1.4.7. GPRS (Servicio de radiotransmisión de paquetes generales)

Es una tecnología digital de telefonía móvil que consiste esencialmente en agregarle a GSM una infraestructura de datos en paquetes, esta añadidura permite un nuevo mundo de aplicaciones como navegación Web, aplicaciones multimedia y aplicaciones de tipo

¹⁴ En telecomunicaciones es un término que se refiere a servicios de extensión de conectividad en un lugar diferente a la casa donde el servicio fue registrado.

empresarial. Los intervalos de tiempo en GSM son asignado mediante una conexión conmutada, en tanto que en GPRS son asignados mediante un sistema basado en la necesidad a la conexión de paquetes (o conexión no conmutada), este tipo de comunicación se orienta al tráfico de datos.

GPRS permite la transferencia de datos del paquete con una tasa de datos teóricos de alrededor de 171.2 Kbits/s (hasta 114 Kbits/s en la práctica). Gracias a su modo de transferencia de paquetes, las transmisiones de datos sólo usan la red cuando es necesario. Por lo tanto permite que el usuario reciba facturas por volúmenes de datos en lugar de la duración de conexión, lo que significa que el usuario puede permanecer conectado sin costo adicional.

En la Figura 1.16, se muestra el esquema de comunicación de un sistema GPRS.

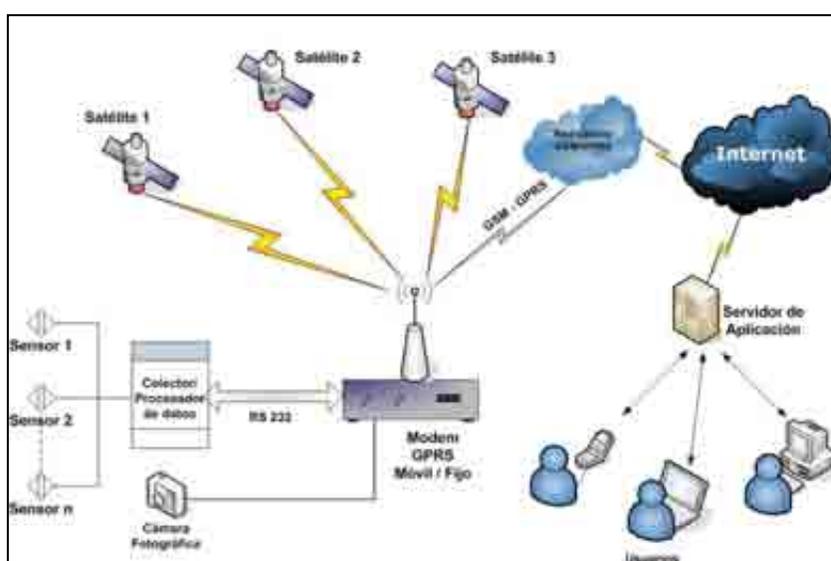


Figura 1.16. Esquema de comunicación GPRS

Existen tres clases de dispositivos móviles teniendo en cuenta la posibilidad de usar servicios GSM y GPRS simultáneamente:

- **Clase A:** Estos dispositivos pueden utilizar simultáneamente servicios GPRS y GSM.
- **Clase B:** Sólo pueden estar conectados a uno de los dos servicios en cada momento. Mientras se utiliza un servicio GSM (llamadas de voz o SMS), se suspende el servicio GPRS, que se reinicia automáticamente cuando finaliza el servicio GSM. La mayoría de los teléfonos móviles son de este tipo.
- **Clase C:** Se conectan alternativamente a uno u otro servicio. El cambio entre GSM y GPRS debe realizarse de forma manual.

1.5. Protocolos de comunicación inalámbrica

Conjunto de normas o reglas que definen los procedimientos, convenciones y métodos utilizados que están obligados a cumplirse para la transmisión de datos en las máquinas (pueden ser 2 o más dispositivos conectados a la red) y programas que intervienen en las comunicaciones, sin las cuales la comunicación resultaría caótica y por tanto imposible.

Algunos de los protocolos de comunicación son:

- **Protocolos punto a punto.**

Son los protocolos más antiguos y elementales utilizados para la comunicación mediante una línea de datos entre dos únicos ordenadores. Teniendo como normas básicas algunos criterios:

Cada parte asume un papel durante una sesión de comunicación, identificándose y definiéndose según corresponda al ordenador, siendo el que ha iniciado la sesión y el que responde. Al primero se le llama “comando” y al segundo, “respuesta”; de esta manera se logra controlar correctamente la recepción de datos.

Tiempo máximo que debe pasar entre el envío de un mensaje y la recepción del acuse de recibo desde la estación receptora.

Número veces que se debe repetir un mensaje en caso de que, pasados los tiempos correspondientes, no se reciba el mensaje de acuse de recibo.

- **Comunicación entre redes.**

Además de la norma que se acaba de describir, se ha de especificar la forma de identificar al terminal concreto de la red con el que se debe establecer la comunicación en el caso de que las máquinas que se están comunicando directamente sean servidores de una red local (LAN). Por ejemplo asignando un número a cada uno de los terminales.

Sistemas de polling: Estos sistemas controlan las comunicaciones en una red dirigida por un ordenador central, y se organizan de manera que es éste el que les pregunta secuencialmente a todos los ordenadores de la red si tienen algo que comunicar, y les insta a que lo hagan en caso afirmativo, ningún otro componente de la red toma, en ningún momento, la iniciativa de la comunicación.

- **Protocolos de transmisión de paquetes:**

En los protocolos de transmisión de paquetes la transmisión se apoya en la propia información contenida en los datos que transitan por las redes de comunicaciones, mientras que en los protocolos anteriores, la responsabilidad del buen funcionamiento de las comunicaciones recae sobre los equipos y las líneas de datos. Para ello los datos se "trocean" y

organizan en paquetes, como cartas de correo ordinario, con sus datos de origen y destino y van de equipo en equipo.

Los equipos que conforman las redes se limitan a leer las direcciones contenidas en los paquetes de datos y a entregar a la siguiente posta el paquete, quien a su vez la entregará a otra y así sucesivamente hasta que finalmente llegue al destino.

- **El protocolo TCP/IP.**

TCP/IP son las siglas de "Transfer Control Protocol / Internet Protocol" y éste es el conjunto de normas de transporte establecido y definido lenguaje establecido para la Red Internet e incorporado por otras redes.

TCP/IP es un protocolo de transmisión de paquetes. Cuando un ordenador quiere mandar a otro un fichero de datos, lo primero que hace es partirlo en trozos pequeños (alrededor de unos 4 Kb) y posteriormente enviar cada trozo por separado. Cada paquete de información contiene la dirección en la Red donde ha de llegar, y también la dirección del remitente, por si hay que recibir respuesta. Los paquetes viajan por la Red de forma independiente.

Como entre dos puntos de la Red suele haber muchos caminos posibles, cada paquete escoge el que en ese momento es óptimo, dependiendo de factores como saturación de las rutas o atascos. Así, puede pasar que parte de un fichero que se envía desde EE.UU. hasta España pase por cable submarino hasta el Norte de Europa y de allí hasta España, y otra parte venga por satélite directamente. Esto permite que Internet sea una red estable, ya que, por su propia dimensión y complejidad, existen cientos de vías alternativas para un destino concreto, por lo que, aunque fallen ordenadores intermediarios o no funcionen correctamente algunos canales de información, prácticamente, siempre hay comunicación entre dos puntos de la Red.

Otra consecuencia de la estructura y forma de actuar de TCP/IP es que admite la eventualidad de que algún paquete de información se pierda por el camino por algún suceso indeseado como que un ordenador intermediario se apague o se sature cuando está pasando por él un trozo de un determinado fichero en transmisión. Si esto ocurre, siempre queda abierta la posibilidad de volver a solicitar el paquete perdido, y completar la información sin necesidad de volver a transferir todo el conjunto de datos. En algunos servicios de Internet, como el FTP¹⁵, automáticamente se vuelve a pedir el envío del paquete perdido, para que el fichero solicitado llegue a su destino íntegramente. Sin embargo, en otros servicios como es la Navegación por la World Wide Web, la pérdida de uno de estos paquetes implica que en la pantalla del receptor no aparezca una imagen o un texto en el lugar donde debería estar, pero siempre existe la posibilidad de volver a solicitar dicha información.

- **CSMA/CA**

Carrier Sense, Multiple Access, Collision Avoidance (acceso múltiple por detección de portadora con evasión de colisiones) es un protocolo de control de acceso a redes de bajo nivel

¹⁵ File transfer protocol.

que permite a múltiples estaciones utilizar un mismo medio de transmisión. Cada equipo anuncia opcionalmente su intención de transmitir antes de hacerlo para evitar colisiones entre los paquetes de datos (comúnmente en redes inalámbricas, ya que estas no cuentan con un modo práctico para transmitir y recibir simultáneamente). De esta forma, el resto de equipos de la red sabrán cuando hay colisiones y en lugar de transmitir la trama en cuanto el medio está libre, se espera un tiempo aleatorio adicional corto y solamente si, tras ese corto intervalo el medio sigue libre, se procede a la transmisión reduciendo la probabilidad de colisiones en el canal. CSMA/CA es utilizada en estándares como el 802.11 basada en redes inalámbricas.

1.6. Ventajas y desventajas de las redes inalámbricas

Una de las tecnologías más prometedoras y discutidas en esta década es la de comunicación inalámbrica, facilitan operaciones en lugares donde la conexión de cables es complicada, lo cual posibilita la comunicación entre dispositivos que se encuentran en lugares de difícil acceso.

La principal ventaja es prácticamente una obviedad, la movilidad. Pero implica algo más que el simple hecho de poder acceder a cualquier red establecida desde el sofá o el escritorio sin complicaciones.

Edificios históricos, instalaciones industriales que no permiten o en las cuales se dificulta la instalación de cables; lugares demasiado amplios donde el cableado es inviable, o situaciones donde el cableado resulta ser demasiado costoso; son unos buenos ejemplos de cómo este tipo de red se puede hacer imprescindible. Por otro lado, el acceso a la red es simultáneo y rápido. A nivel técnico hay que decir que la reubicación de terminales es sencilla y, en consecuencia, su instalación es rápida.

Poseen capacidad de cruzar zonas de agua, tales como ríos o lagos, en donde una instalación con cable requeriría de un trato especial para prevenir las filtraciones sobre los conductos de cobre. Además de poder vencer obstáculos en la transmisión causados por la presencia de montañas y valles, donde los costos de la instalación de cable serían demasiado elevados y difíciles de mantener.

Respecto a redes móviles (celulares), dan la posibilidad de tener una conexión privada evitando la ocupación de la central de operador local, puede evitar los elevados costos de alquiler, mediante un sistema de radio privado ya sea éste propio o arrendado.

Como principal desventaja encontramos la pérdida de velocidad de transmisión respecto al cable y las posibles interferencias en el espacio. Además, al ser una red abierta puede ocasionar problemas de seguridad, aunque cada vez más los usuarios disponen de información y mecanismos de protección como la tradicional y eficiente contraseña. En los años 90 se llegó a dudar incluso de la salubridad de esta red, teoría que ha quedado refutada en la actualidad.

Si hablamos de las redes de gran alcance que hacen posibles conexiones a kilómetros, en este caso no hay comparación posible con el cable, ya que nos abren un mundo de posibilidades. Se puede poner como ejemplo la evolución de los teléfonos móviles.

Se tiene muchos tipos de redes inalámbricas, las cuales tienen sus propias capacidades y limitaciones las cuales se ajustan a las necesidades del usuario. Sin lugar a dudas es una tecnología aun con deficiencias que serán subsanadas en su proceso evolutivo deparándonos todavía grandes sorpresas.

1.7. Microcontroladores

Un microcontrolador es un circuito integrado de alta escala de integración que incorpora la mayor parte de los elementos que configuran un controlador. El cual dispone de normalmente de los siguientes componentes:

- Procesador o UCP (Unidad Central de Proceso).
- Memoria RAM para contener los datos.
- Memoria para el programa tipo ROM/PROM/EPROM.
- Líneas de Entrada/Salida para comunicarse con el exterior.
- Módulos para control de periféricos (Temporizadores, puertas serie, etc.).
- Generador de impulsos de reloj que sincronizan el funcionamiento de todo el sistema.

Los dispositivos que usan microcontroladores disponen de las siguientes ventajas:

- Mayor control sobre un determinado elemento, lo cual representa una mejora considerable en el mismo.
- Aumento de la fiabilidad: al usar un microcontrolador disminuye el riesgo de averías y se precisan menos ajustes.
- Reducción del tamaño en el producto acabado: la integración del microcontrolador en un chip disminuye el volumen, la mano de obra.
- Mayor flexibilidad: las características de control están programadas por lo que su modificación solo necesita cambios en el programa de instrucciones.

El microcontrolador es en definitiva un circuito integrado que incluye todos los componentes de un computador. Debido a su reducido tamaño es posible montar el

controlador en el propio dispositivo al que gobierna. En este caso el controlador recibe el nombre de controlador embebido (embedded controller).

1.7.1. Características generales

Un microcontrolador contiene toda la estructura (Figura 1.17) de un computador contenido en un circuito integrado.

Se trata de un circuito integrado de alta escala de integración que incorpora la mayor parte de los elementos que configuran un controlador.

En la Figura 1.17, se muestra la estructura de un microcontrolador.

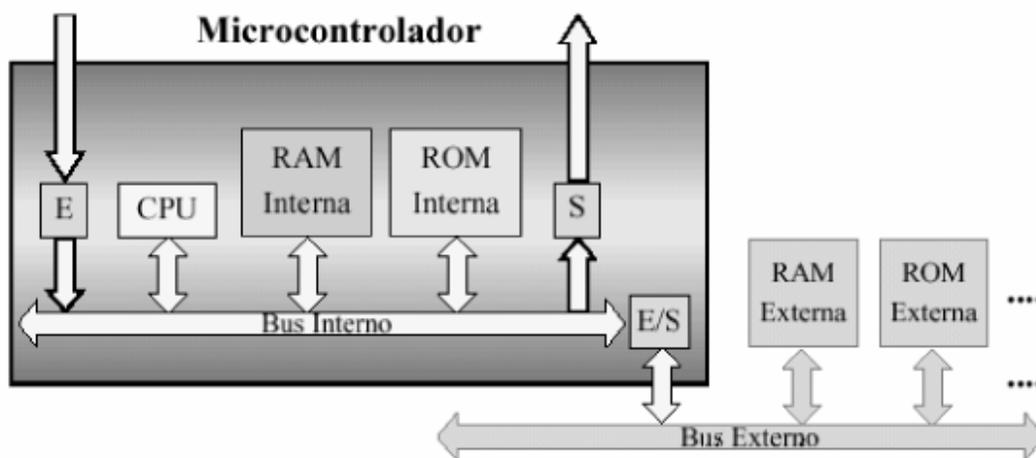


Figura 1.17. Estructura típica de un microcontrolador

Según el modelo de microcontrolador que se trate, el tamaño y el tipo de memoria pueden diferir, así como el número de líneas de E/S y los módulos de control de periféricos.

1.7.2. Gamas de los microcontroladores

El fabricante Microchip realiza una clasificación en gamas. Cada gama tiene características en común y que la distinguen de las demás.

1.7.2.1. La gama baja

La gama baja de los PIC encuadra nueve modelos fundamentales en la actualidad. La memoria de programa puede contener 512, 1K o 2K palabras de 12 bits, y ser de tipo ROM,

OTP o EPROM. La memoria de datos RAM puede tener una capacidad comprendida entre 25 y 73 bytes. Sólo disponen de un temporizador (TMR0), un repertorio de 33 instrucciones y un número de terminales para soportar las E/S comprendido entre 12 y 20. Al no disponer de interrupciones, la pila sólo tiene dos niveles de profundidad.

El voltaje de alimentación admite un valor muy flexible comprendido entre 2 y 6.25 voltios, lo cual posibilita el funcionamiento mediante pilas corrientes teniendo en cuenta su bajo consumo, menos de 2mA a 5V y 4 MHz.

1.7.2.2. La gama media

En esta gama sus componentes añaden nuevas prestaciones a las que poseen los de la gama baja, haciéndoles más adecuados en las aplicaciones complejas. El repertorio es de 35 instrucciones y la longitud de las instrucciones es de 14 bits. Admiten interrupciones, poseen comparadores de magnitudes analógicas, convertidores A/D, puertas serie y diversos temporizadores.

Algunos modelos disponen de una memoria de instrucciones del tipo OTP y otros de memoria EEPROM. El temporizador TMR1 de que dispone esta gama tiene un circuito oscilador que puede trabajar asincrónicamente y que puede incrementarse aunque el microcontrolador se halle en modo de reposo, posibilitando la implementación de un reloj en tiempo real.

Las líneas de E/S de la puerta B presentan unas resistencias de carga pull-up activadas por software.

1.7.2.3. La gama alta

En la actualidad, esta gama está formada principalmente por tres modelos cuyas características responden a microcontroladores de arquitectura abierta, pudiéndose expansionar hacia el exterior al poder sacar los buses de datos, direcciones y control. Así se pueden configurar sistemas similares a los que utilizan los microprocesadores convencionales, siendo capaces de ampliar su configuración interna, añadiendo nuevos dispositivos de memoria y de E/S externas, Esta facultad obliga a estos componentes a tener un elevado número de terminales comprendido entre 40 y 44.

Admiten interrupciones, poseen puerto serie, varios temporizadores y mayores capacidades de memoria, que alcanza los 8K palabras en la memoria de instrucciones y 454 bytes en la memoria de datos. El formato de las instrucciones es de 16 bits y la pila dispone de 16 niveles de profundidad. El repertorio es de 55 o 58 instrucciones según modelo. La frecuencia máxima de funcionamiento es de 25 MHz, con un ciclo de instrucción de 160ns.

1.8. Sensores de Temperatura Resistivos (RTD)

La resistividad de un metal aumenta al incrementar la temperatura dado que los iones de este vibran con mayor amplitud, dificultando el avance de los electrones a través del conductor. Su símbolo es el siguiente, en el que se indica una variación lineal con coeficiente de temperatura positivo.

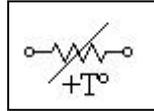


Figura 1.18. Símbolo RTD

1.8.1. Características de los metales

- Alto coeficiente de temperatura de resistencia, dándole mayor sensibilidad ante la temperatura; su conductividad eléctrica disminuye con el aumento de temperatura.
- Alta resistividad.
- Relación lineal, respecto a resistencia vs temperatura.
- Rigidez y ductilidad: proceso de fabricación de estirado y arrollamiento del conductor.
- Se tiene mayor exactitud en las medidas físicas, por sus propiedades.

1.8.1.1. Material de los sensores

Los sensores pueden estar hechos de varios materiales, mostramos algunas características relevantes de los más utilizados:

- **Platino:**
 - Metal óptimo para RTDs (precisión y estabilidad).
 - Rango de medida [-200°C a +850°C].
 - Coste elevado.
 - Se utiliza como patrón.
- **Níquel:**
 - Rango de medida [-150°C a +300°C].
 - Más barato que el platino.

- Falta de linealidad.
- **Cobre:**
 - Rango de medida [-200°C a +120°C].
 - Barato.
 - Estable.
 - Lineal para temperaturas cercanas a temperatura ambiente.

1.8.1.2. Curvas Características

En la Figura 1.19, se muestra las curvas características para el platino, cobre y níquel.

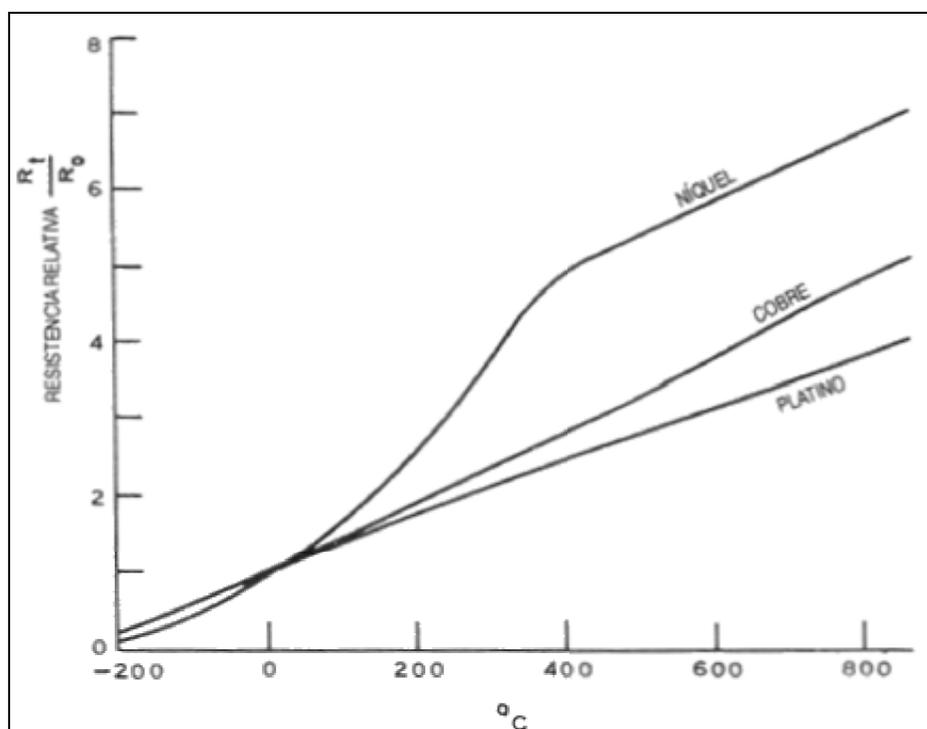


Figura 1.19. Linealidad en un rango de temperatura

El material que forma el conductor, se caracteriza por el "coeficiente de temperatura de resistencia (α)", este se expresa en un cambio de resistencia en ohmios del conductor por grado de temperatura a una temperatura específica. Para casi todos los materiales, el coeficiente de temperatura es positivo, pero para otros muchos el coeficiente es esencialmente constante en grandes posiciones de su gama útil.

La variación de la resistencia puede ser expresada de manera polinómica como sigue a continuación. Por lo general, la variación es bastante lineal en márgenes amplios de temperatura.

$$R_t = R_0 (1 + \alpha \Delta T)$$

Donde:

- R_t es la resistencia en ohmios a T °C.
- R_0 es la resistencia a la temperatura en ohmios a 0 °C.
- ΔT es la desviación de temperatura respecto a T_0 ($\Delta T = T - T_0$)
- α es el coeficiente de temperatura del conductor especificado a 0 °C, interesa que sea de gran valor y constante con la temperatura.

De las expresiones anteriores se deduce claramente que una resistencia metálica aumenta su valor con la temperatura

Tabla 1.3. Propiedades de algunos materiales usados para los sensores RTD

Parámetro	Platino (Pt)	Cobre (Cu)	Níquel (Ni)
Resistividad $\mu\Omega cm$	10.6	1.673	6.844
α ($\Omega/\Omega/K$)	0.00385	0.0043	0.00681
R_0 (Ω)	25, 50, 100, 200	10	50, 100, 120
Margen (°C)	-200 a +850	-200 a +260	-80 a +230

Ecuación de Callendar –Van dussen:

La ecuación de Callendar para el intervalo positivo, de 0 a +850 °C. El término de 2° orden δ , en la función propuesta por Callendar estableció una mejor aproximación basada en la diferencia entre la temperatura real y la temperatura calculada solo con el modelo lineal de primer orden de alfa, $R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t)$ que solo cubre el intervalo de 0 a 100 °C.

$$R_t = R_0 + R_0 \cdot \alpha \cdot \left[t - \delta \cdot \left(\frac{t}{100} - 1 \right) \cdot \left(\frac{t}{100} \right) \right]$$

Ecuación de Callendar – Van Dusen para el intervalo negativo, de -200 a 0 °C. El término de 4° orden β , en la función establecida por Van Dusen y aplicada para $T < 0^\circ\text{C}$, se basa en la diferencia entre la temperatura real y la temperatura resultante de la ecuación anterior empleando solo los coeficientes α y δ .

$$R_t = R_0 + R_0 \cdot \alpha \cdot \left[t - \delta \cdot \left(\frac{t}{100} - 1 \right) \cdot \left(\frac{t}{100} \right) - \beta \cdot \left(\frac{t}{100} - 1 \right) \cdot \left(\frac{t}{100} \right)^3 \right]$$

Del valor de alfa (α) y de las constantes delta (δ) y beta (β) podemos sustituir para la obtención de las constantes A, B y C que por simplicidad son más ampliamente utilizadas y descrita en normas:

$$R_t = R_0 \cdot [1 + A \cdot t + B \cdot t^2]$$

$$R_t = R_0 \cdot [1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot t^3 \cdot (t - 100)]$$

Donde:

$$A = \alpha + \frac{\alpha \cdot \delta}{100}$$

$$B = -\frac{\alpha \cdot \delta}{100^2}$$

$$C = -\frac{\alpha \cdot \beta}{100^4}$$

1.8.2. Tipos de sensores

Existen sensores RTD de dos tipos según su construcción: de bobinado y de laminado:

- **Bobinado:**

Presenta al material sensible enrollado en el núcleo en forma de hélice, lo que permite su contracción y dilatación. La bobina del núcleo puede ser circular o plana, pero siempre debe estar acompañado de algún aislante eléctrico. Se toma específicamente un acero inoxidable en el núcleo para cerrar la unión de la expansión con el platino, luego es templado y se recubre, proporcionando un completo sellamiento de la sensibilidad del elemento. Siempre está protegido en una cápsula, este tipo de sensor presenta una mucha mayor estabilidad respecto al laminado.

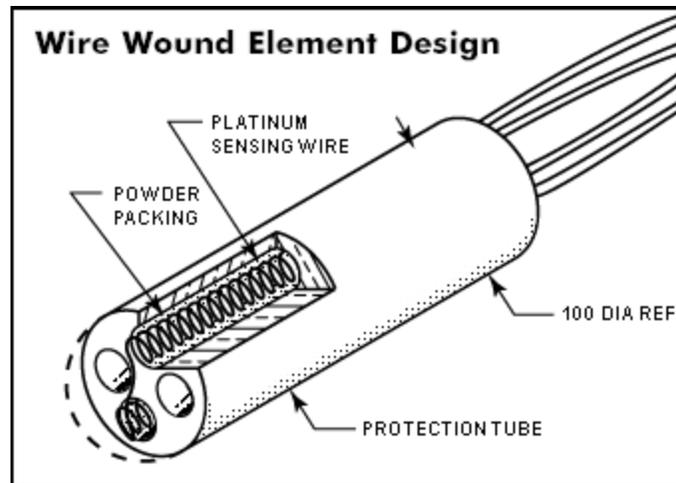


Figura 1.20. Sensor de temperatura bobinado

- **Laminado:**

Está compuesto por láminas de cristal colocados encima de los cables estirados y del puente de wheastone para protegerlos de las acciones que puedan dañar el comportamiento del sensor como abrasión, deformación de cables, vibraciones, ataques químicos, variaciones bruscas de presión, etc. Debido a que tiene menor longitud del material de medida (platino, níquel, etc.) el precio se reduce. Tiene como ventaja baja masa térmica, haciendo que el sensor manifieste respuestas en corto tiempo de manera práctica. Sin embargo, estos tipos de sensores no son tan estables comparados con los sensores de tipo bobinado.

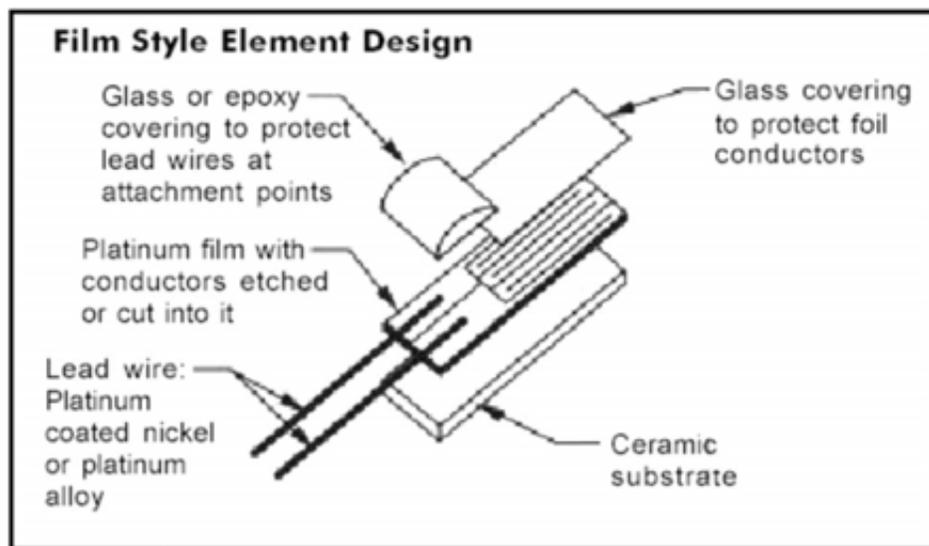


Figura 1.21. Sensor de temperatura laminado

1.8.3. Acondicionamiento de la señal

Para medir la temperatura implica medir la resistencia de la RTD, mediante su curva o tabla de calibración. Pero este método no ofrece una señal eléctrica proporcional a la temperatura objeto de medición que puede ser registrado o medida fácilmente. Si se hace circular una corriente “I” conocida teniendo en cuenta la limitación que impone el auto calentamiento, por la RTD, se mide la tensión a través de la misma, esta señal eléctrica será directamente proporcional a la temperatura.

El puente de wheatstone es un dispositivo eléctrico de medida utilizado para medir resistencias desconocidas mediante el equilibrio de los brazos del puente. Conformado por 4 resistencias, una fuente de tensión y un galvanómetro. Las sondas de resistencias se conectan a estos puentes, en configuraciones de dos, tres o cuatro hilos.

Los RTD pueden construirse con 2, 3 o 4 hilos conductores extendidos desde el sensor. Es importante considerar:

- Exactitud requerida
- Estabilidad
- Ubicación del dispositivo receptor
- Condiciones ambientales
- Resistencia nominal del sensor.

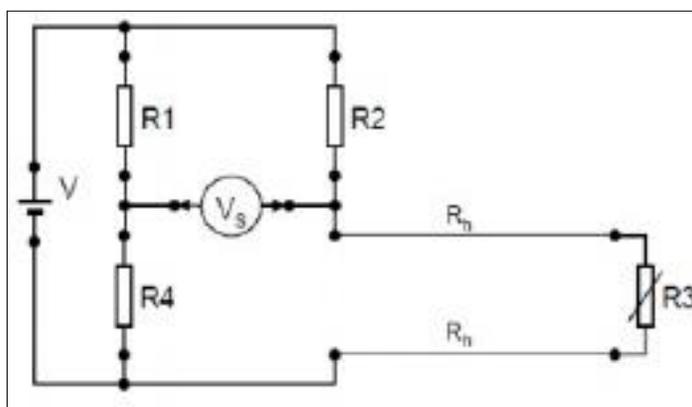


Figura 1.22. Puente de wheatstone

- **RTD de dos hilos:**

Es la configuración más simple y menos costosa. El aplicar este dispositivo proporciona una medida de temperatura acertada cuando el dispositivo se encuentra conectado directamente al receptor, sin utilizar cables de extensión.

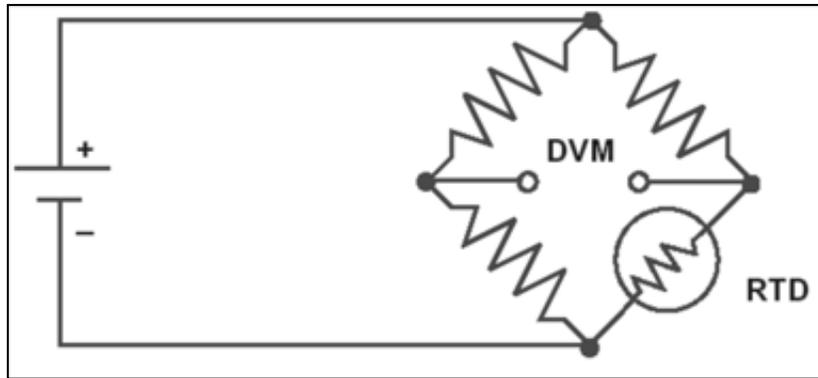


Figura 1.23. Configuración de dos hilos

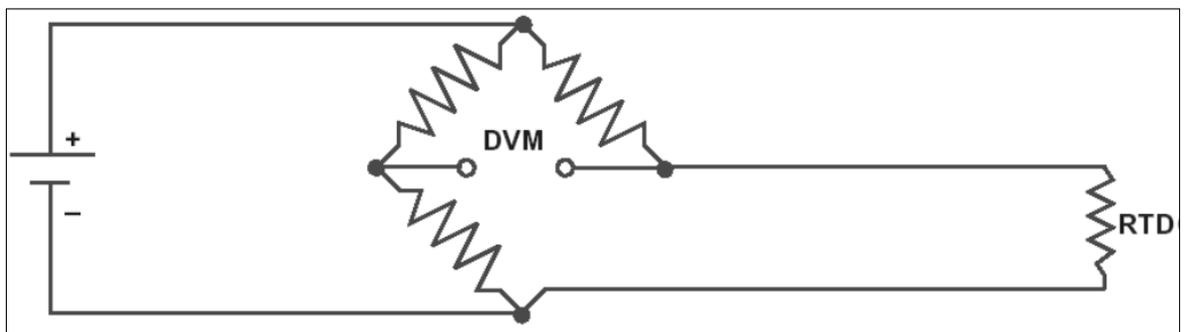


Figura 1.24. Cables de extensión del sensor RTD para realizar la medida

En la Figura 1.25, se puede apreciar como la impedancia de cables afecta la lectura de la temperatura:

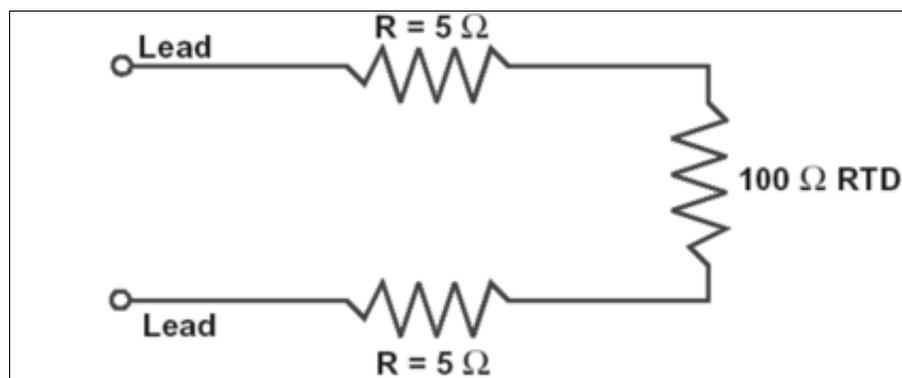


Figura 1.25. Efecto de resistencia a la conducción

- **RTD de tres hilos:**

La sonda se encuentra conectada mediante tres hilos al puente. De esta forma, la temperatura ni la longitud de los cables afectan la medida. Esta configuración también se encuentra sujeta a corrosión.

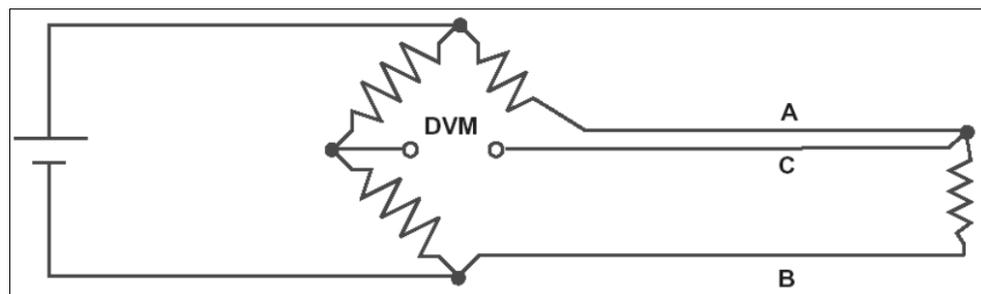


Figura 1.26. Configuración de tres hilos

- **RTD de cuatro hilos:**

Se utiliza para obtener la mayor precisión posible en la medida, como en el caso de los convertidores digitales de temperatura o la calibración de patrones de resistencias. Se puede utilizar conductores de menor calibre, ya que no hay problema con la resistencia del cable.

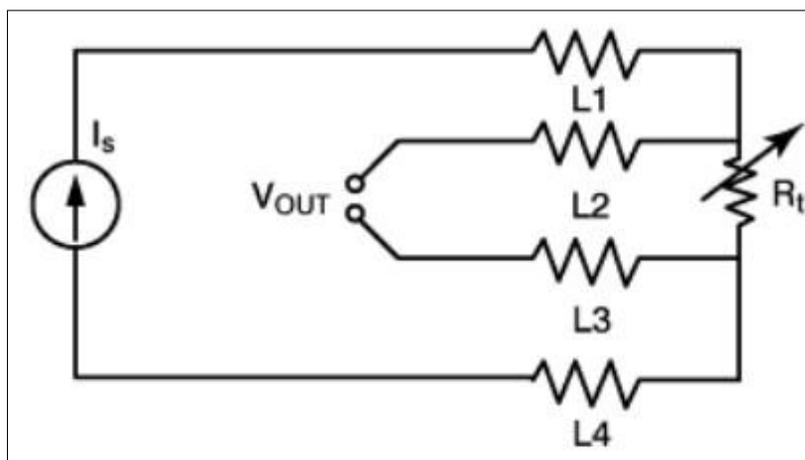


Figura 1.27. Configuración de cuatro hilos

1.8.4. Aplicaciones

Debido a que este tipo de sensores están enfocados a la medición de temperatura, las aplicaciones dependen más del área en la cual estos son aplicados, ya que por sus

características medias entre los demás sensores de temperatura, los RTDs pueden ser usados en la mayoría de los procesos industriales. Por ejemplo existen empresas como RTD Company que se dedican a la manufactura de este tipo de sensores para distintas áreas, como la industria de generación de energía, la medicina, la industria farmacéutica, la industria alimenticia, motores, procesos de manufactura entre otras aplicaciones.

Capítulo II

Protocolo de comunicación inalámbrica

1.1. Protocolo ZigBee

1.1.1. Introducción al Protocolo

El nombre "ZigBee" se deriva de los patrones comunicativos que hacen muchas abejas entre las flores durante la recogida de polen. Esto es evocador de las redes invisibles de las conexiones existentes en un entorno totalmente inalámbrico.

En los escenarios de redes WPAN nos encontramos con tecnologías radio de corto alcance, menores a 10 metros, lo cual, unido a su baja complejidad, bajo consumo de potencia y bajo coste, ha facilitado su rápida proliferación. WPAN se pueden conformar grupos de usuarios cercanos (*hot-spots*¹⁶) que comparten bandas de frecuencias sin licencia, como por ejemplo 2.4 GHz. Entre estas tecnologías WPAN, cabe destacar a la familia IEEE 802.15.1 o Bluetooth, cuyo objetivo principal es el reemplazo de cables para el intercambio de datos entre dispositivos y el control de periféricos con regímenes binarios de hasta 3 Mbit/s.

Por otra parte, la tecnología ZigBee se implementa en WPAN para comunicaciones de radios digitales de bajo consumo. Esta tecnología implementa un bajo régimen binario en sus transmisiones y maximiza la vida útil de las baterías. ZigBee se despliega en entornos de comunicación, facilitando servicios de comunicación entre dispositivos de tipo domótico, de procesos industriales y la adquisición de datos médicos como la monitorización de pacientes.

Todos estos ejemplos de comunicaciones basadas en ZigBee poseen regímenes binarios de hasta 250 kbit/s. ZigBee se considera dentro del grupo de tecnologías IEEE 802.15.4. En los escenarios WPAN también existen tecnologías radio de elevado régimen binario, como la tecnología radio de banda ultra-ancha (UWB).

¹⁶ En telecomunicaciones, es una zona de alta demanda de tráfico.

1.1.2. Definición

ZigBee es un estándar, el cual está definido por un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica para su utilización con radio digital de bajo consumo.

Diseñado por ZigBee Alliance, la cual es una comunidad internacional de más de 100 compañías como Motorola, Mitsubishi, Philips, Samsung, Honeywell, Siemens, entre otras; teniendo como objetivo habilitar redes inalámbricas con capacidad de control y monitoreo que sean confiables, de bajo consumo energético y de bajo costo, que funcione vía radio y de modo bidireccional; todo basado en un estándar público global que permita a cualquier fabricante crear productos que sea compatibles entre ellos.

ZigBee puede ser implementadas por cualquier fabricante, está basado en el estándar IEEE 802.15.4 de WPAN (Wireless personal area network). IEEE 802.15.4 de WPAN es un estándar que define el nivel físico y el control de acceso al medio de redes inalámbricas de acceso personal, con tasas bajas de transmisión de datos (low-rate wireless personal area network, LR-WPAN). Este estándar se ha vuelto muy sólido en el monitoreo y control de redes incluyendo, no sólo ZigBee technology si no también RF4CE industry consortium, WirelessHART™ technology y muchas otras redes de trabajo. IEEE 802.15.4 tiene como propósito ofrecer una solución completa para este tipo de redes construyendo los niveles superiores de la pila de protocolos que el estándar no cubre.

El objetivo de ZigBee se encuentra en requerimientos de comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías, esta tecnología tiene mayor influencia sobre la domótica debido a su bajo consumo, conexiones con distintos tipos de topología y su fácil integración, es decir no se requiere de mucha electrónica para fabricar sus nodos.

Las tecnologías inalámbricas han adoptado, con el paso del tiempo, una manera más sencilla y cómoda de utilizar toda clase de dispositivos con el fin de mejorar el uso y las comunicaciones en general. Ésta tesis aborda la tecnología inalámbrica ZigBee, basada en el estándar IEEE 802.15.4 que por su poca introducción al mercado no es muy conocida a pesar de que no es muy reciente.

ZigBee comunica una serie de dispositivos haciendo que trabajen más eficientemente entre sí. Es un transmisor y un receptor que usa baja potencia para trabajar y tiene como objetivo las aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías. Es ideal para conexiones con diversos tipos de topología, lo que a su vez lo hace más seguro, barato y que no haya ninguna dificultad a la hora de su construcción porque es muy sencilla.

ZigBee es la tecnología inalámbrica del futuro que no tiene competencia fuerte con las tecnologías existentes, debido a que sus aplicaciones son de automatización de edificios, hogareñas e industriales, especialmente para aplicaciones con usos de sensores.

ZigBee se ha desarrollado para satisfacer la creciente demanda de capacidad de red inalámbrica entre varios dispositivos de baja potencia. ZigBee, se está utilizando para la próxima generación de fabricación automatizada, con pequeños transmisores en cada dispositivo, lo que permite la comunicación entre dispositivos a una computadora central.

1.1.3. Estructura

Una de las maneras más comunes para establecer una red de comunicación (cableada o inalámbrica) es usando el concepto de las capas de red. Cada capa es responsable de determinadas funciones en la red. Las capas normalmente pasan datos y comandos solo a las capas directamente por encima y debajo de ellas.

En la Figura 2.1, se muestra la estructura de la arquitectura en capas de la tecnología ZigBee el cual trabaja con el estándar IEEE 802.15.4.

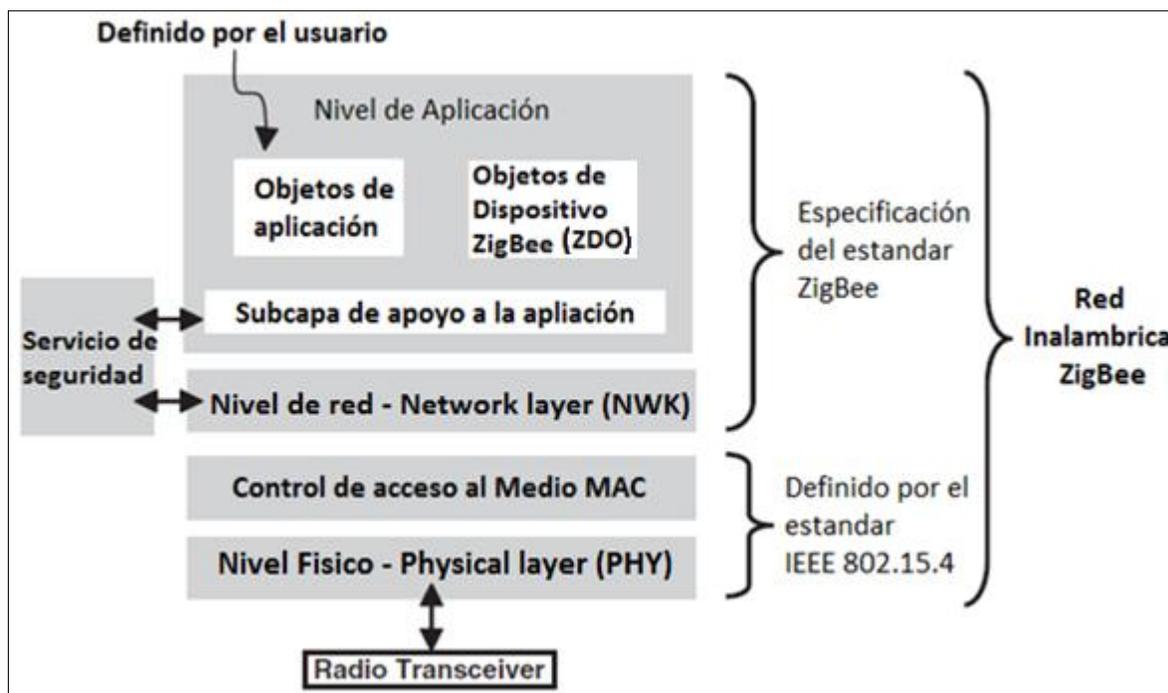


Figura 2.1. Estructura de la arquitectura ZigBee

Las capas del estándar ZigBee se basan en el modelo básico de referencia OSI (Open System Interconnect). Como se muestra en la Figura 2.1, las dos capas inferiores de las capas de la red están definidas por el estándar IEEE 802.15.4. Este estándar es desarrollado por el comité de estándares IEEE 802 y fue publicado en el 2003. IEEE 802.15.4 define las especificaciones para los niveles físicos y niveles MAC de la red inalámbrica. Las capas

superiores son definidas por la Alianza ZigBee y corresponden a las capas de red y de aplicación las cuales contienen los perfiles del uso, ajustes de la seguridad y la mensajería.

El nivel de red se encarga del direccionamiento lógico y de la determinación de ruta. Este nivel permite el correcto funcionamiento del subnivel MAC y da al nivel superior un interfaz adecuado con el cual trabajará.

La entidad de datos crea y gestiona las unidades de datos del nivel de red a partir de payload (arranque o inicio) del nivel de aplicación. Además realiza el ruteo en base a la topología de la red en la que el dispositivo se encuentra.

Este nivel tiene también funciones de control, tales como controlar la disposición de nuevos dispositivos y el establecimiento de nuevas redes. Este puede decidir si un dispositivo colindante pertenece a la red e identifica nuevos routers y vecinos. El control puede detectar así mismo la presencia de receptores, lo que posibilita la comunicación directa y la sincronización a nivel MAC.

La capa de aplicación es el más alto definido por la especificación y, por tanto, la interfaz efectiva entre el nodo ZigBee y sus usuarios. En él se ubican la mayor parte de los componentes definidos por la especificación, tanto los objetos de dispositivo ZigBee (ZiBee device objects; ZDO) como sus procedimientos de control.

Dividiendo al protocolo de red en capas se tiene muchas ventajas. Por ejemplo, si el protocolo cambia con el tiempo, es más fácil reemplazar o modificar la capa afectada por el cambio que reemplazar todo el protocolo.

El estándar ZigBee sólo define el trabajo en red, la aplicación y capas de seguridad del protocolo y adopta las capas de nivel físico y MAC de IEEE 802.15.4 como parte del protocolo de red ZigBee. Por lo tanto, cualquier dispositivo compatible con ZigBee también lo es con IEEE802.15.4.

IEEE 802.15.4 fue desarrollado independientemente del estándar ZigBee, y es posible la construcción de una red inalámbrica de corto alcance basada únicamente en IEEE 802.15.4 y no implementada con las capas específicas de ZigBee. En este caso, los usuarios desarrollan sus propias redes/aplicación del protocolo de capa en la parte superior de las capas del nivel físico y MAC del estándar IEEE 802.15.4 (ver Figura 2.2). Estas personalizaciones de las capas de redes/aplicaciones, son normalmente más sencillo que las capas del protocolo ZigBee y van dirigidos a aplicaciones específicas.

En la Figura 2.2, se muestra un protocolo de red basado en el estándar IEEE 802.15.4 y no conformado por el estándar ZigBee

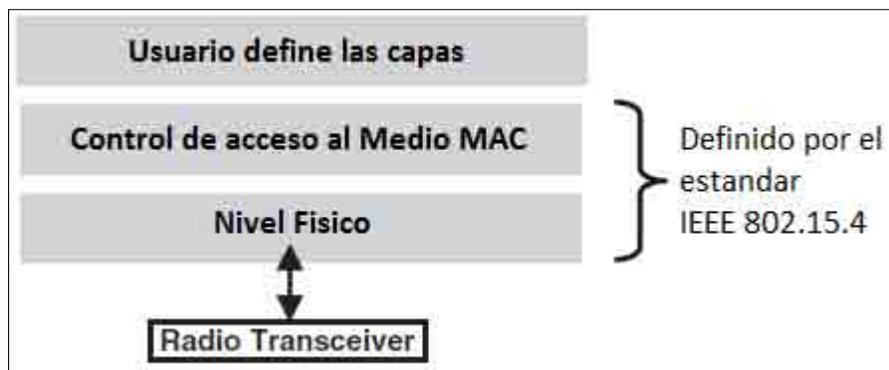


Figura 2.2. Protocolo de red basado en el estándar IEEE 802.15.4

1.1.4. Características

- Cada módulo ZigBee, al igual que ocurre con las direcciones MAC de los dispositivos ethernet, tiene una dirección única. En el caso de los módulos ZigBee cada uno de ellos tiene una dirección única de 64bits que viene grabada de fábrica. Por otro lado, la red ZigBee, utiliza para sus algoritmos de ruteo direcciones de 16 bits. Cada vez que un dispositivo se asocia a una red ZigBee, el Coordinador al cual se asocia le asigna una dirección única en toda la red de 16bits. Por eso el número máximo teórico de elementos que puede haber en una red ZigBee es de $2^{16} = 65535$, que es el n° máximo de direcciones de red que se pueden asignar.

- Existe 3 bandas de frecuencias en las que opera:

- 868–868.6 MHz (banda 868 MHz)
- 902–928 MHz (banda 915 MHz)
- 2400–2483.5 MHz (banda 2.4 GHz)

La banda 868 MHz es usada en Europa para un número de aplicaciones, incluyendo redes inalámbricas de corto alcance. Las otras dos bandas (915 MHz y 2.4 GHz) son bandas de frecuencias para uso industrial, científica y médica (ISM). La banda de frecuencias 915 MHz es usada en Norte América, mientras que la banda de 2.4 GHz es usada en todo el mundo.

- El objetivo de ZigBee no es obtener velocidades muy altas si no obtener sensores cuyos transceptores tengan un muy bajo consumo energético. Puede alcanzar un ancho de banda de 20 a 250 Kbps en un rango de transmisión de 10 a 100 metros (esto varía dependiendo de la serie del módulo utilizado).

- Complejidad y consumo energético bajos, esto se logra ya que los dispositivos ZigBee pasan la mayor parte del tiempo en un estado latente, es decir, durmiendo para tener menor consumo. La tecnología ZigBee se centra en la sencillez y bajo costo. El nodo más complejo

en ZigBee emplea aproximadamente el 10% del hardware de un nodo Bluetooth o Wi-Fi típico. El nodo más simple sólo requiere cerca del 2%. Sin embargo el código empleado es bastante extenso, acercándose al 50% del tamaño de la tecnología Bluetooth.

- Su empleo se basa en el monitoreo y control. Sus aplicaciones son muy amplias. La tecnología ZigBee se puede utilizar para realizar control industrial, albergar sensores empotrados, reconocimiento remoto, juguetes interactivos, recolectar datos médicos, ejercer labores de detección de humo o intrusos o domótica.

- Permite tres topologías de red: Estrella, mallado y árbol de cluster; depende de la serie.
- La fabricación de un transmisor ZigBee consta de menos circuitos analógicos de los que se necesitan habitualmente.
- Respecto a su fragmentación, tiene nueva capacidad para dividir mensajes más largos y permitir la interacción con otros protocolos y sistemas.
- ZigBee presenta gran agilidad de frecuencia, ya que sus redes cambian los canales en forma dinámica en caso que ocurran interferencias.
- Su red está definida por tres tipos de dispositivos ZigBee: Coordinador, router y dispositivo final.
- ZigBee puede utilizar la encriptación AES¹⁷ de 128 bits, que permite la autenticación y encriptación en las comunicaciones muy segura. AES tiene un tamaño de bloque fijo de 128 bits y tamaños de llave de 128, 192 ó 256 bits.
- Tiene la desventaja de tener menos cobertura debido a que pertenece a redes inalámbricas de tipo WPAN.
- Manipula textos pequeños comparados con otras tecnologías.

1.1.5. Aplicaciones

Esta tecnología se centra en aplicaciones de requerimientos muy bajos de transmisión de datos y de bajo coste. La red en su conjunto utiliza una cantidad pequeña de energía, de tal forma que cada dispositivo pueda tener una autonomía de hasta 5 años antes de necesitar un cambio en su sistema de alimentación.

Su empleo se basa en la monitorización y control. Sus aplicaciones son muy amplias, utilizándose en automatización del hogar, automatización comercial de edificios, telecomunicaciones, control industrial, cuidado de salud personal mediante monitoreo y medicaciones automatizadas.

¹⁷ Advanced Encryption Standard.

Los módulos XBee, pueden ser ajustados para usarse en redes de configuración punto a punto, punto a multipunto o peer to peer (igual a igual).

En la Figura 2.3, se muestra una conexión multipunto, con un coordinador, conectado a varios nodos.

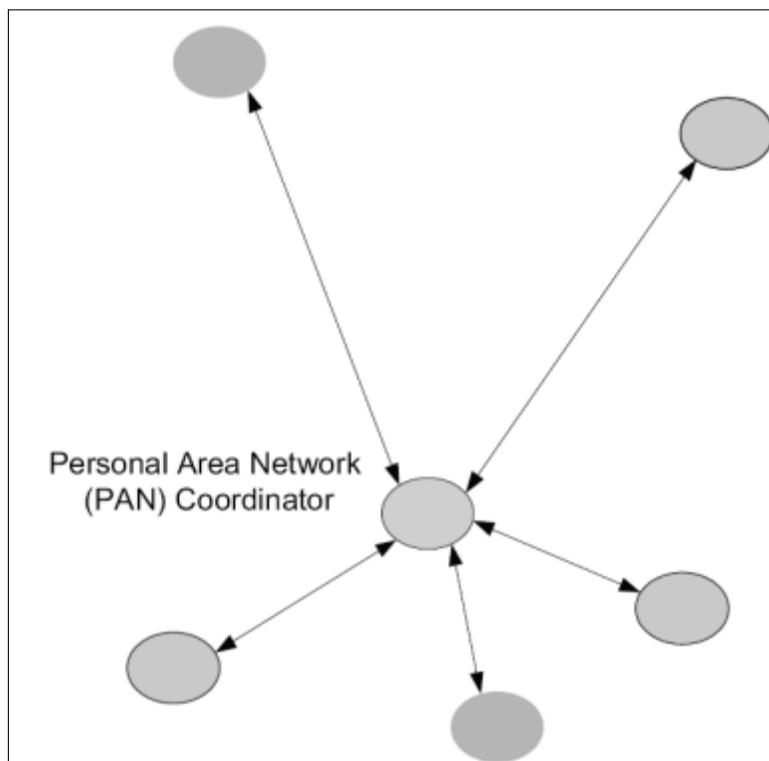


Figura 2.3. Coordinador pan con múltiples nodos

Digi¹⁸ tiene 2 series de módulos disponibles. Los módulos XBee Serie 2 permite hacer redes mesh; la serie 1 no.

También existen los llamados módulos XBee PRO de la Serie 2 que se diferencian en la capacidad de alcance, permitiendo en algunos casos doblar la distancia de transmisión, ya que poseen una mayor potencia en la señal. Con los módulos XBee PRO de la Serie 2, es posible crear redes más complejas, como las llamadas MESH. Estas permiten acceder a un punto remoto, utilizando módulos intermedios para llegar como routers. Además los módulos automáticamente generaran la red entre ellos, sin intervención humana alguna, permitiendo la reparación de la red en caso de que algún nodo falle. Al mismo tiempo la red por sí sola resuelve la mejor ruta para un determinado paquete.

¹⁸ Digi es la compañía que desarrolla estos módulos.

En la Figura 2.4, se muestra un ejemplo de la conexión mesh, se observa que se quiere llegar del punto A al B.

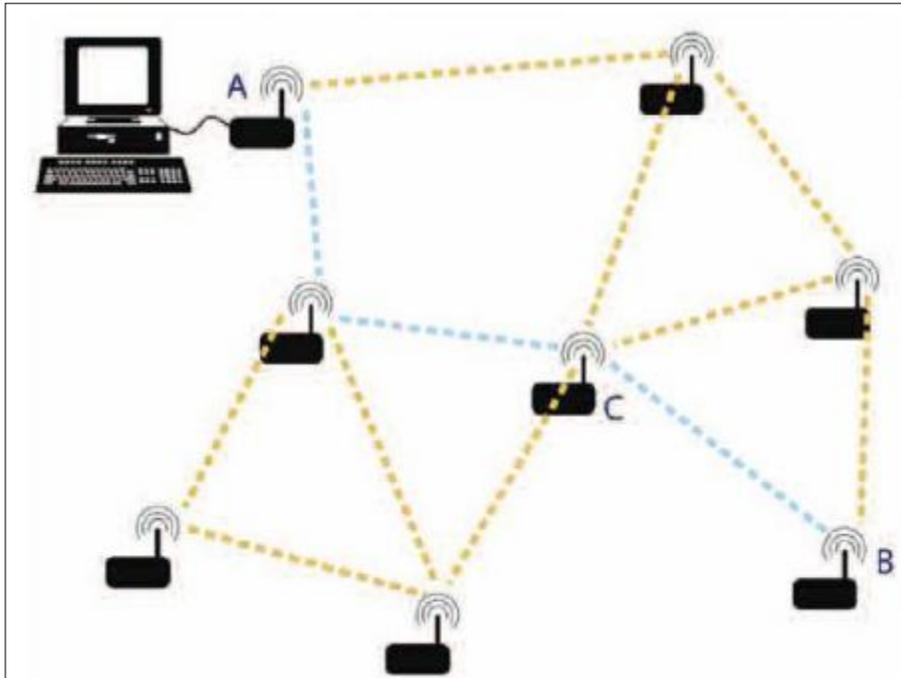


Figura 2.4. Red MESH para módulos XBEE PRO

La figura anterior muestra un ejemplo de una red MESH. Se observa que se desea acceder al punto B a partir del punto A. Suponiendo que la distancia entre A y B es demasiado para que alcance la señal, se utiliza la red MESH para poder alcanzarla, así cada nodo ubicado en medio del camino mostrado en celeste, funciona como módulo transparente, donde todo lo que le llega es retransmitido hacia el punto A. Esto funciona para cada uno de los módulos de la red.

1.1.6. Circuito básico para el XBee

En la Figura 2.5, se muestra las conexiones mínimas que necesita el módulo XBee para poder ser utilizado. Luego de esto, se debe configurar según el modo de operación que se desea para la aplicación requerida por el usuario.

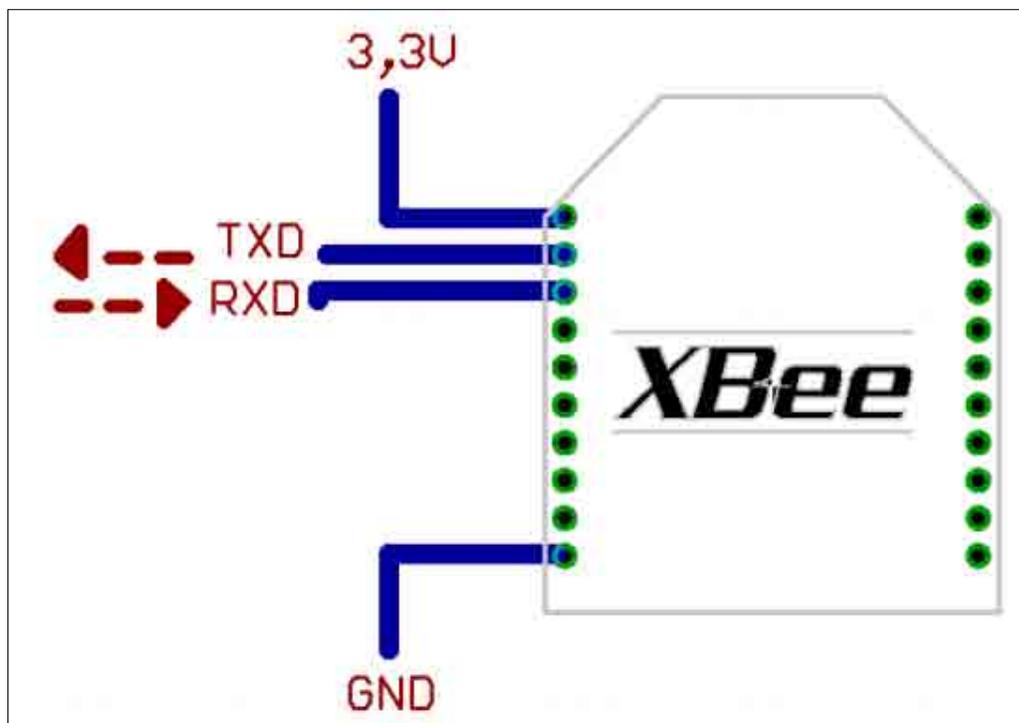


Figura 2.5. Conexiones mínimas requeridas para el XBEE.

El módulo requiere una alimentación desde 2.8 a 3.4 V, la conexión a tierra y las líneas de transmisión de datos por medio del UART¹⁹ (TXD y RXD) para comunicarse con un microcontrolador, o directamente a un puerto serial utilizando algún conversor adecuado para los niveles de voltaje.

Esta configuración, no permite el uso de Control de Flujo (RTS & CTS; Request to send & Clear to send), por lo que ésta opción debe estar desactivada en el terminal y en el módulo XBee. En caso de que se envíe una gran cantidad de información, el buffer del módulo se puede sobrepasar. Para evitar existen dos alternativas:

- Bajar la tasa de transmisión.
- Activar el control de flujo.

1.1.7. Dispositivos de una red ZigBee

Hay dos tipos de dispositivos en una red inalámbrica IEEE 802.15.4: full-function devices (FFDs) y reduced-function devices (RFDs). Un FFD es capaz de realizar todas las tareas que se describen en el estándar IEEE 802.15.4 y puede aceptar cualquier papel en la red. Una RFD, por otro lado, tiene capacidades limitadas. Por ejemplo, un FFD puede comunicarse

¹⁹ Universal Asynchronous Receiver-Transmitter, en español, Transmisor-Receptor Asíncrono Universal

con cualquier otro dispositivo en la red, pero un RFD puede hablar solo con un dispositivo FFD. Un dispositivo RFD está destinado para aplicaciones simples como encender o apagar un interruptor. El tamaño de procesamiento de energía y memoria de los dispositivos RFD son normalmente menores que de los dispositivos FFD.

En una red IEEE 802.15.4, un dispositivo FFD puede tomar tres diferentes roles: coordinador, coordinador PAN y dispositivo. Un coordinador es un dispositivo FFD que es capaz de transmitir mensajes. Si el coordinador es el controlador principal de una red de área personal (PAN), se llama un coordinador de PAN. Si un dispositivo no está actuando como un coordinador, es llamado simplemente dispositivo.

El estándar ZigBee utiliza terminología ligeramente diferente (ver Figura 2.6). Un coordinador ZigBee es un coordinador de PAN IEEE 802.15.4. Un router ZigBee es un dispositivo que pueda actuar como coordinador IEEE 802.15.4. Por último, un dispositivo final ZigBee es un dispositivo que no es un coordinadora ni un router. Un dispositivo final ZigBee tiene el tamaño mínimo de memoria y menor número de capacidades de procesamiento y características. Un dispositivo final es normalmente el dispositivo con menos prestaciones en la red.

En la Figura 2.6, se muestra los papeles que pueden tener los dispositivos en una los estándares IEEE 802.15.4 y ZigBee.

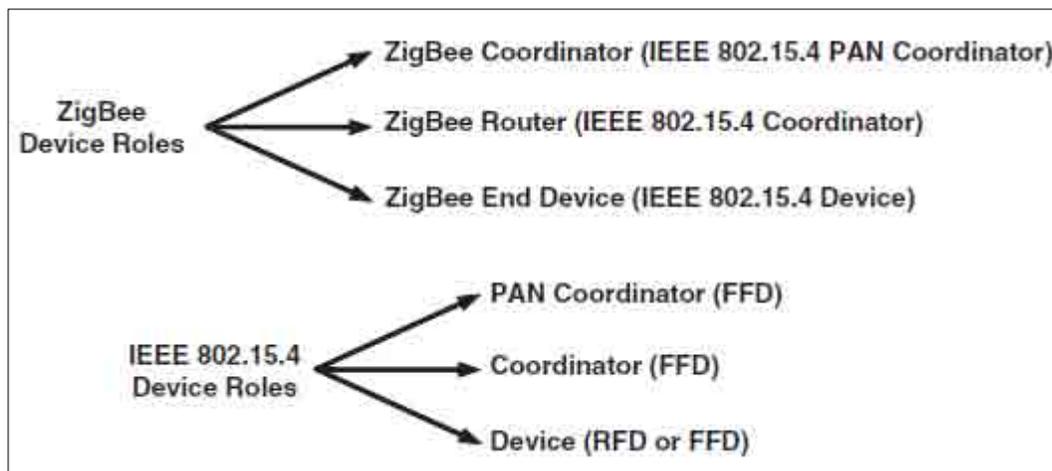


Figura 2.6. Roles de los dispositivos en los estándares IEEE 802.15.4 y ZigBee

1.1.7.1. Coordinador ZigBee (ZC)

Es el tipo de dispositivo más completo. Entre sus funciones se detecta la de ser el encargado de controlar la red y los caminos o rutas que se deben seguir la comunicación entre ellos. Solo puede existir un coordinador por red.

- **Inicialización**

Normalmente se crea una única copia de los parámetros de configuración de la red para los objetos pertenecientes a los ZDO. Además, se pueden definir parámetros para describir el Node Descriptor, Power Descriptor, Simple Descriptor, e incluso los terminales activos.

La aplicación del dispositivo realiza una petición en la lista de canales para realizar una búsqueda o escaneo de los canales indicados. La confirmación resultante obtiene una lista detallada de los PANs activos. La aplicación del dispositivo compara la lista de canales con la lista de red y selecciona uno de los canales que se encuentre libre. Una vez se identifica el canal, la aplicación del dispositivo selecciona los atributos de seguridad de la capa y trama correspondientes a los parámetros de configuración. Después la aplicación verifica si se ha podido establecer el PAN en el canal.

- **Operación Normal**

En este estado, el coordinador ZigBee debe permitir que otros dispositivos se unan a la red basándose en sus parámetros de configuración; como pudieran ser la duración de la incorporación del dispositivo a la red o el número máximo de elementos que se pueden unir.

El coordinador ZigBee debe responder a cualquier dispositivo u operaciones del servicio de descubrimiento de su propio dispositivo o de cualquier dispositivo que tenga asociado y que esté dormido. La aplicación del dispositivo debe asegurarse de que el número de entradas de enlace no excede de los indicados en los parámetros de configuración. Por tanto, el coordinador ZigBee tiene que soportar el control del proceso de incorporación a la red de cualquier dispositivo.

El coordinador tiene que mantener una lista de los dispositivos asociados y facilitar el soporte para elementos huérfanos, permitiendo que se vuelvan a unir a la red, permitiendo que los dispositivos se incorporen directamente en la red.

Por otro lado, el coordinador ZigBee debe soportar primitivas que permitan eliminar o desasociar los dispositivos que estén bajo su control. El coordinador procesa las peticiones de solicitud del router o de los dispositivos finales. Una vez recibida la solicitud de desconexión el coordinador espera un tiempo para recibir una segunda petición de desconexión. Si le llega en un tiempo determinado, el coordinador ZigBee pasará a examinar el identificador del perfil (Profile ID) para ver si coincide. Si coincide, lo incluye en una lista llamada “App Out Cluster List” para que deje de pertenecer a la red. Si no coincide se enviará un error al dispositivo que solicita la desconexión, es decir, el dispositivo seguirá perteneciendo a la red.

- **Operación del Centro de Validación**

El coordinador ZigBee tiene la función de ser el Centro de Validación (Trust Center) cuando la seguridad está habilitada en la red. Al centro de validación se le notifica si existen nuevos dispositivos en la red por medio del APSME²⁰. El centro de validación puede permitir que el dispositivo permanezca en la red o bien se le fuerce a salir de ella.

Si el centro de validación decide permitir que el dispositivo permanezca en la red, debe establecer una clave maestra con el dispositivo a no ser que ya exista una clave maestra previa entre ellos. Una vez intercambiada dicha clave, el centro de validación y el dispositivo ahora negociarán una clave para establecer la conexión.

El centro de validación entonces proporciona al dispositivo la clave de red (NWK key) para que el dispositivo pueda establecer peticiones al coordinador.

1.1.7.2. Router ZigBee (ZR)

Interconecta dispositivos separados en la topología de la red, además de permitir la ejecución de un código de usuario para su configuración, manejado como un nivel de aplicación.

- **Inicialización**

Por regla general se crea una única copia de los parámetros de configuración de la red para los objetos pertenecientes a ZDO. Si se puede, se crean los elementos de configuración para el Complex Descriptor, el User Descriptor, el número máximo de entradas de enlace y la clave maestra.

La aplicación del dispositivo utiliza el ChannelList y sus parámetros de configuración para buscar o escanear los canales que se le indiquen. El resultado permite obtener la lista de red con los PAN activos en la red.

Entonces se realizan varias peticiones de descubrimiento para obtener cuales son realmente los elementos que existen en la red y asociar los enlaces en la capa de red. La aplicación del dispositivo compara el ChannelList con la NetworkList para seleccionar los PAN existentes que se deben unir. Una vez que el PAN al que unirse se ha identificado, la aplicación del dispositivo debe realizar una petición para asociar el PAN en el canal. Después debe chequear el estado de verificación de la asociación en el coordinador u otros routers seleccionados en ese PAN.

²⁰ Entidad gestora del APS (subcapa de soporte de aplicación del protocolo ZigBee).

Si la red tiene la seguridad activada, el dispositivo tiene que esperar a que el centro de validación le proporcione la clave maestra y establecer con éste la clave de enlace. Una vez establecido espera a que el centro de validación de pase la clave de red. Ahora ya que está autenticado puede funcionar como un router de la red.

- **Operación Normal**

En este estado, el router debe permitir que otros dispositivos se unan a la red basándose en los parámetros de configuración que tiene, como el número de elementos máximos o el tiempo en el que puede estar un elemento en la red.

Cuando un dispositivo nuevo se une a la red, la aplicación del dispositivo debe ser informada. Cuando se haya admitido en el PAN, el router debe indicarle la confirmación de la conexión. Si la seguridad está habilitada, el dispositivo debe informar al centro de validación.

El router ZigBee debe responder a cualquier dispositivo descubierto o a operaciones del servicio de descubrimiento, tanto de su propio dispositivo como de cualquier otro asociado que pudiera estar dormido.

Si la seguridad está activada, el router debe utilizar la clave maestra para establecer los procedimientos para la gestión de la clave de enlace (Link Keys).

El router debe soportar el establecimiento de una clave maestra con el dispositivo remoto y establecer entonces la clave de enlace. El router tiene que poder almacenar y eliminar las claves de enlace para destinos conocidos que requieran que la comunicación sea segura con lo que debe poder recibir las claves del centro de validación.

El router debe permitir también la eliminación de la red de dispositivos asociados bajo su control de aplicación. Este mantiene una lista con los dispositivos asociados y tiene que facilitar el soporte para que los procesos de búsqueda e incorporación de elementos huérfanos de los dispositivos que previamente han estado asociados, puedan volver a unirse a la red.

1.1.7.3. Dispositivo final (ZED)

Posee la funcionalidad necesaria para comunicarse con su nodo padre (el coordinador o un router), pero no puede transmitir información destinada a otros dispositivos; de esta forma, este tipo de nodo puede permanecer en reposo la mayor parte del tiempo, aumentando la vida media de sus baterías. Un ZED tiene requerimientos mínimos de memoria y es por tanto significativamente más barato.

- **Inicialización**

La aplicación del dispositivo debe obtener de la lista de canales la configuración para escanear los canales especificados. El resultado debe contener una lista de red (Network List) detallando los PAN activos en la red. Al igual que el router, se realizan varias peticiones de descubrimiento para saber cuántos elementos son los que hay en la red.

La aplicación del dispositivo debe comparar la lista de canales con la lista de red para deducir a qué red debe unirse. En el algoritmo debe indicarse entre otras cosas: el modo de operación de la red, identificación del router o coordinador de la red, capacidad del router o coordinador, coste de enrutamiento, etc. Una vez hecho, debe chequear la asociación con el router o el coordinador ZigBee en el PAN.

Si la red tiene la seguridad habilitada, el dispositivo tiene que esperar a que el centro de validación negocie primero la clave maestra, seguido de la clave de enlace y finalmente la clave de red (NWK), tras lo que se considerará que estará autenticado y listo para unirse a la red.

- **Operación Normal**

El dispositivo final ZigBee debe responder a cualquier dispositivo descubierto o a las peticiones de operación del servicio de descubrimiento de su propio dispositivo.

Si la seguridad está habilitada, igual que en el apartado anterior, debe negociar primero la clave maestra y seguidamente la clave de enlace, con lo que tiene que poder almacenar también las claves de enlace de los destinos que requieran una comunicación segura. Debe poder gestionar estas claves, tanto para almacenar como para eliminar. Por tanto tiene que poder mantener una comunicación con el centro de validación para actualizar las claves de red (NWK key).

1.1.8. Topología

Una característica del ZigBee es que el número de nodos totales es de 65535, distribuidos en subredes de 255; lo que permite tres tipos de topologías de red: Estrella, mallado y árbol.

1.1.8.1. Topología en Estrella

La configuración de red en estrella consta de un coordinador (máster) y uno o más dispositivos finales (nodos; ver Figura 2.7). En una red en estrella, todos los dispositivos finales se comunican únicamente con el coordinador. Si un dispositivo final necesita transferir

datos a otro dispositivo final, este envía sus datos al coordinador. El coordinador selecciona y reenvía los datos al nodo destinatario.

En la Figura 2.7. se muestra la configuración de red tipo estrella que se puede hacer usando ZigBee.

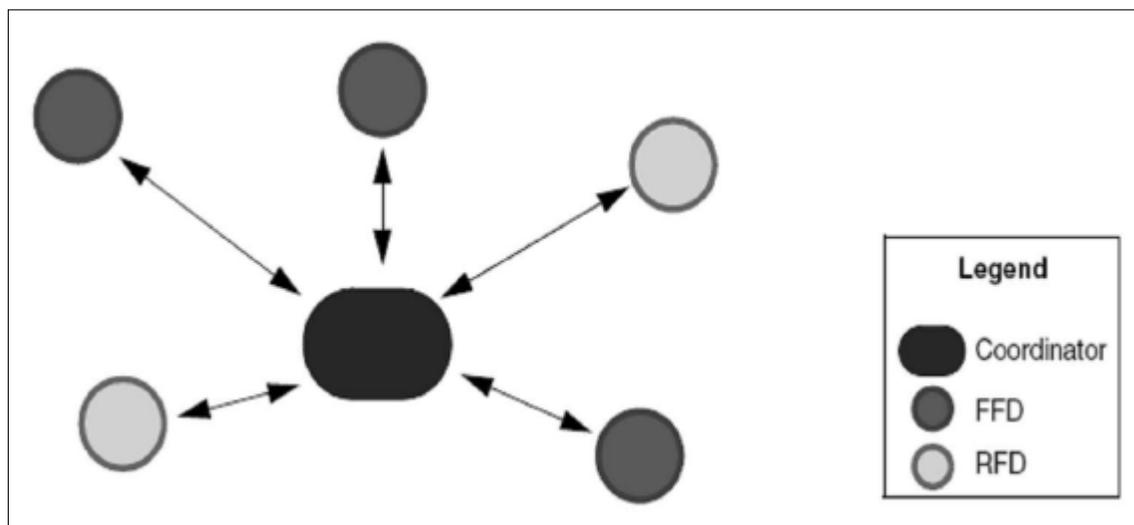


Figura 2.7. Configuración de red en estrella

En la configuración en estrella, uno de los dispositivos tipo FFD asumen el rol de coordinador de red y es responsable de inicializar y mantener los dispositivos en la red. Todos los demás dispositivos ZigBee, conocidos con el nombre de dispositivos finales, hablan directamente con el coordinador.

1.1.8.2. Topología en Árbol (Cluster Tree)

En esta configuración, los dispositivos finales pueden unirse unos con otros por medio de coordinadores o ruteadores. Los ruteadores ofrecen dos funciones. Uno es el incremento del número de nodos que puedan estar en la red. La otra es la ampliación física del rango de alcance de la red. Con el ingreso de un ruteador, un dispositivo final no necesita estar a un rango determinado de radio del coordinador. Todos los mensajes en la topología en árbol se enrutarían a lo largo del árbol.

En la Figura 2.8, se muestra la configuración de red tipo árbol que se puede hacer usando ZigBee.

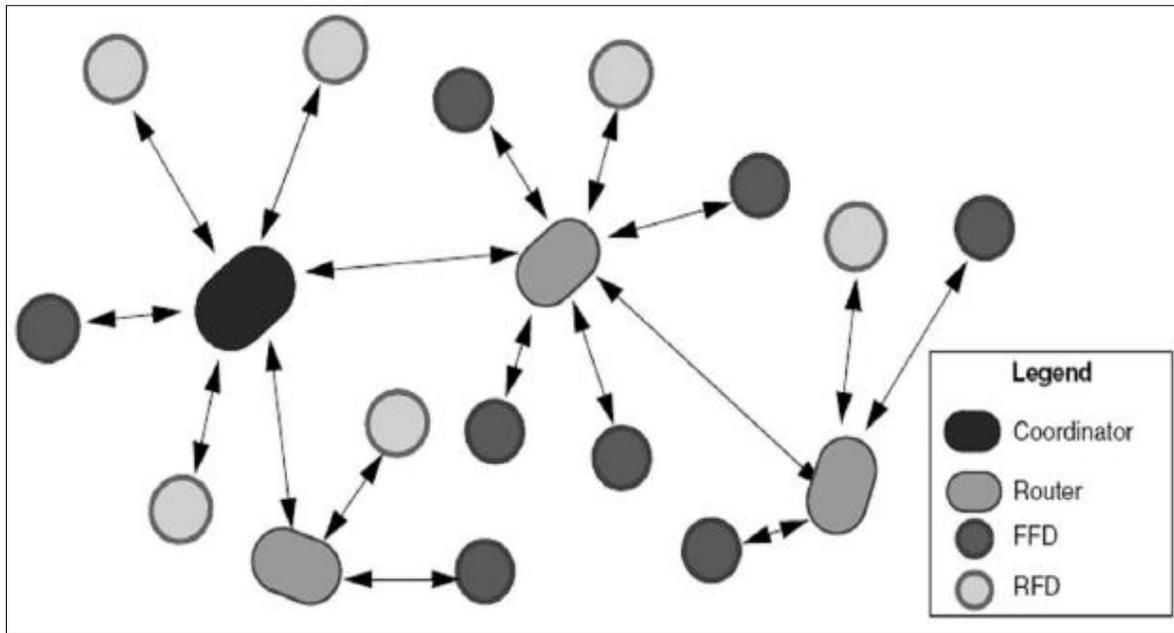


Figura 2.8. Conexión tipo árbol (Cluster Tree)

Muchos dispositivos son FFDs y los RFD pueden conectarse como un nodo único al final de la red. Cualquiera de los FFDs restantes puede actuar como coordinadores y proveer servicios de sincronización hacia otros dispositivos o coordinadores.

1.1.8.3. Topología en Mallas

Una red en malla es similar a la red ramas de árbol, excepto que los FFDs pueden comunicarse directamente con otros FFDs, lo que no ocurre en la topología anterior. La ventaja de esta topología es que puede reducirse la latencia e incrementarse la confiabilidad.

En la Figura 2.9, se muestra la configuración de red en mallas que se puede tener usando ZigBee.

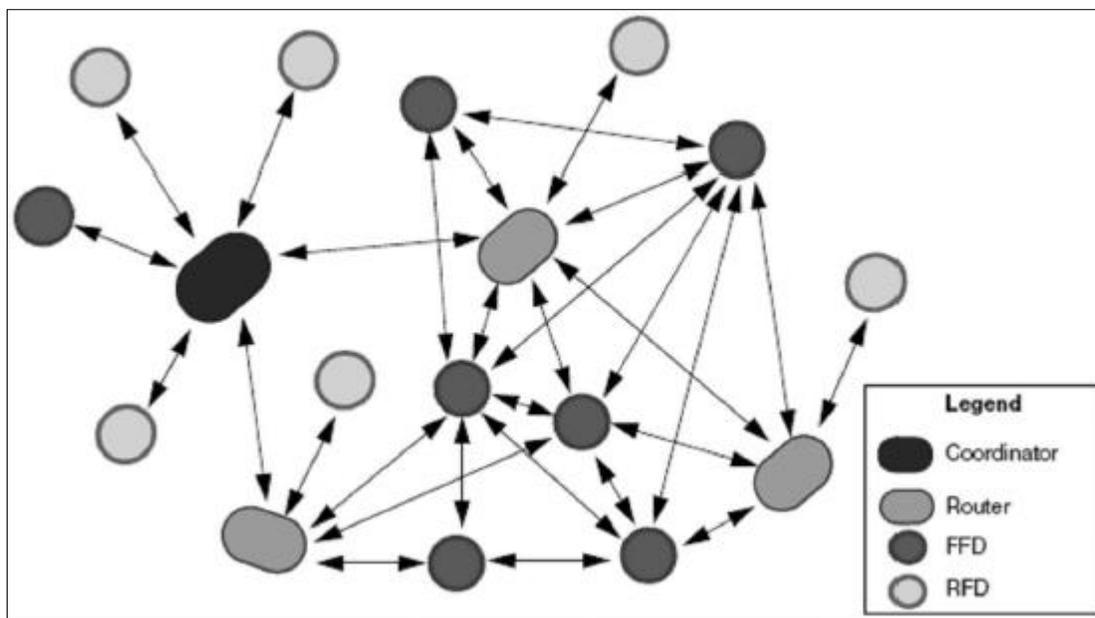


Figura 2.9. Conexión en Mallado

Las topologías de red en árbol y malla se las conocen también como redes multi salto (multi-hop), debido a las habilidades de enrutar los paquetes a través de múltiples dispositivos, mientras que la topología en estrella se la conoce como red simple a salto (single-hop), debido a que el paquete realiza un único salto para llegar a su destino. La red ZigBee es una red multi-acceso, principalmente porque todos los nodos en la red tienen igual acceso al medio de comunicación.

1.1.9. Seguridad

En una red inalámbrica, los mensajes transmitidos pueden ser recibidos por cualquier aparato cerca, como un intruso. Hay dos preocupaciones principales de seguridad en una red inalámbrica.

La primera es la confidencialidad de datos. El dispositivo intruso puede obtener información simplemente escuchando los mensajes transmitidos. El cifrado de los mensajes antes de la transmisión va a resolver el problema de la confidencialidad. Un algoritmo de cifrado modifica un mensaje utilizando una cadena de bits conocidas como la clave de seguridad, y sólo el destinatario será capaz de recuperar el mensaje original. El estándar IEEE 802.15.4 soporta el uso de Advanced Encryption Standard (AES) para cifrar sus mensajes salientes.

La segunda preocupación es que el dispositivo intruso puede modificar y volver a enviar uno de los mensajes anteriores, incluso si los mensajes están cifrados. Incluye un código de integridad del mensaje (MIC) con cada fotograma de salida permite que el

destinatario sepa si el mensaje ha sido alterado durante el trayecto. Este proceso se conoce como la autenticación de datos.

La encriptación AES de 128bits, permite la autenticación y encriptación en las comunicaciones. Además, existe un elemento en la red llamado Trust Center (Centro de validación) que proporciona un mecanismo de seguridad en el que se utilizan dos tipos de claves de seguridad, la clave de enlace y la clave de red.

Advanced Encryption Standard (AES), es un esquema de cifrado por bloques adoptado como un estándar de cifrado por el gobierno de los Estados Unidos. Se espera que sea usado en el mundo entero y analizado exhaustivamente, como fue el caso de su predecesor, el Data Encryption Standard (DES). Desde 2006, el AES es uno de los algoritmos más populares usados en criptografía simétrica. AES tiene un tamaño de bloque fijo de 128 bits y tamaños de llave de 128, 192 ó 256 bits.

1.1.10. Modo de Operación

Los módulos XBee, pueden operar en 5 modos:

-Modo RECIBIR/TRANSMITIR

-Modo de Bajo Consumo (Sleep Mode)

-Modo de Comando

-Modo Transparente

-Modo de operación API

-IDLE

En la Figura 2.10, se muestra los modos de operación que tiene el modulo XBee.

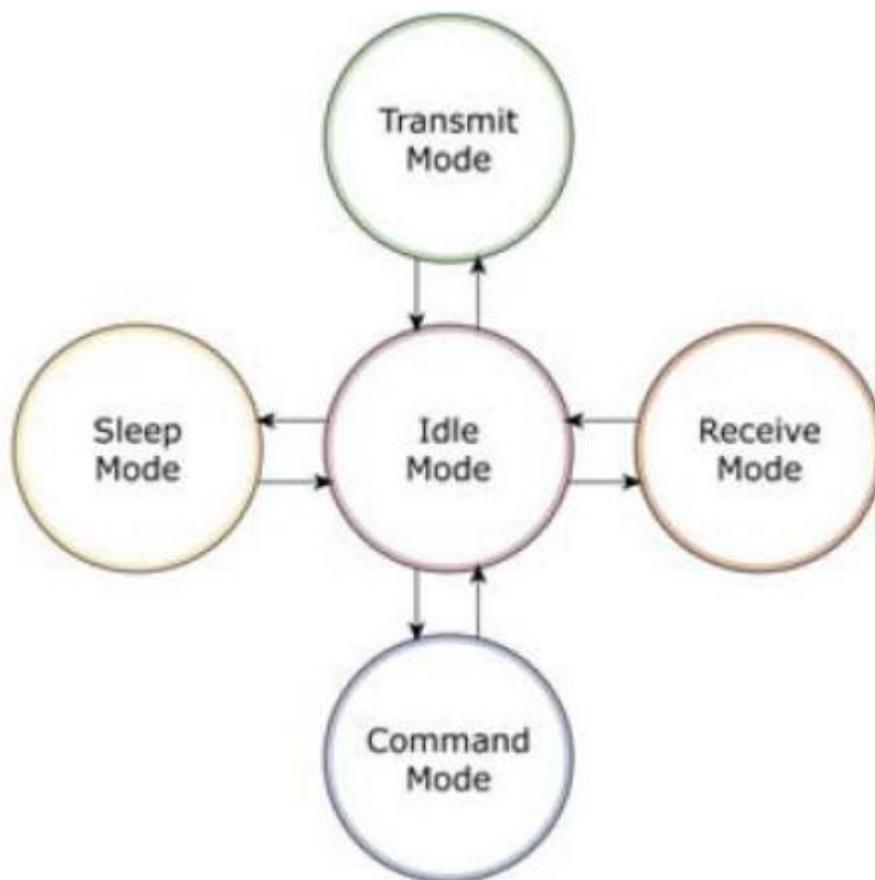


Figura 2.10. Modos de operación del módulo XBee

1.1.10.1. Modo Recibir/Transmitir

Se encuentra en estos modos cuando al módulo le llega algún paquete RF²¹ a través de la antena (modo Receive) o cuando se manda información serial al buffer del pin 3 (UART Data in) que luego será transmitida (modo Transmit).

La información transmitida puede ser Directa o Indirecta. En el modo directo la información se envía inmediatamente a la dirección de destino. En el modo Indirecto la información es retenida durante un período de tiempo y es enviada sólo cuando la dirección de destino la solicita.

Además es posible enviar información por dos modos; Unicast y Broadcast. Por el primero, la comunicación es desde un punto a otro, y es el único modo que permite respuesta de quien recibe el paquete RF, es decir, quien recibe debe enviar un ACK (paquete llamado así, y que indica que recibió el paquete, el usuario no puede verlo, es interno de los módulos) a la dirección de origen. Quien envió el paquete, espera recibir un ACK, en caso de que no le

²¹ Radio Frequency.

llegue, reenviará el paquete hasta 3 veces o hasta que reciba el ACK. En el modo Broadcast la comunicación es entre un nodo y a todos los nodos de la red. En este modo, no hay confirmación por ACK.

1.1.10.2. Modo de Bajo Consumo (Sleep Mode)

El modo de sueño hace posible que el módulo RF entre en un modo de bajo consumo de energía cuando no se encuentra en uso. Para poder entrar en modo de sueño, se debe cumplir una de las siguientes condiciones:

Sleep_RQ (pin 9) está en alto y el módulo está en pin sleep mode (SM= 1,2 o 5).

El módulo está en reposo (no hay transmisión ni recepción de datos) por la cantidad de tiempo definido por ST (Time before Sleep; ST sólo está activado cuando SM=4,5).

La configuración de los ciclos de sueño se realiza principalmente con el comando SM. Por defecto, los modos de sueños están deshabilitados (SM=0), permaneciendo el módulo en estado de reposo/recepción. En este estado el módulo está siempre preparado para responder a un comando, ya sea, por el puerto serial o la interfaz RF.

1.1.10.2.1. Modos de sueño controlado por Pin

- **Pin de Hibernación**

Este modo minimiza el consumo de energía cuando el módulo se encuentra en reposo. Este modo se habilita cuando Sleep_RQ (pin 9) está en alto, el módulo terminará cualquier transmisión, recepción o procedimientos de asociación y entrará en modo de reposo y luego en modo de sueño. En este estado el módulo no responderá a comandos entrantes, ya sea, desde la interfaz serial como RF.

Cuando se baja el estado lógico de Sleep_RQ (pin 9) el módulo saldrá del modo de sueño y estará listo para recibir o enviar datos.

- **Pin Doze**

Este modo funciona de la misma forma que el modo Pin de Hibernación, sin embargo, Pin Doze presenta un tiempo de activación menor y mayor consumo de energía.

Para despertar un módulo operando en modo Pin Doze, se debe bajar Sleep_RQ (pin9) y éste comenzará a transmitir o recibir información cuando la línea CTS (clear to send) este en nivel lógico bajo.

1.1.10.2.2. Modos de sueños cíclicos

- **Sueño cíclico remoto (SM = 4)**

El modo de sueño cíclico remoto permite que el módulo revise la data por la interfaz RF periódicamente. Cuando el parámetro SM es seteado a 4, el módulo se configura para efectuar ciclos de sueño, luego, despierta una vez por ciclo para revisar si existen datos en el coordinador de sueño de la red (SM = 0, CE = 1). El módulo remoto, envía esta solicitud al coordinador a intervalos de tiempo determinados por el parámetro ST (Periodo de dormido). El coordinador transmitirá los datos que se puedan encontrar en su buffer de salida al módulo remoto una vez recibida la solicitud de datos.

En el caso que el coordinador no tenga datos para ser enviados al módulo que realiza la solicitud, el coordinador no transmitirá y el módulo remoto retornará a su estado de sueño. Si existen datos para ser enviados al módulo solicitante, el coordinador se quedará despierto y transmitiendo hasta el Timer ST (Tiempo antes de dormir) se complete.

- **Sueño cíclico remoto y Pin para despertar (SM = 5)**

Este modo se utiliza para despertar un módulo remoto, ya sea por la interfaz RF o por poner en estado bajo el pin Sleep_RQ utilizado para comunicación orientada a eventos. El sueño cíclico funciona de la misma forma que el modo de sueño cíclico remoto con la funcionalidad extra de poder despertar el módulo utilizando un pin.

Cualquier actividad limpiará la cuenta de ST (Tiempo antes de dormir), de esta manera el módulo sólo volverá a dormir luego que no exista alguna actividad durante el periodo de ST. Si el módulo despierta por cambios en el pin Sleep_RQ, los posteriores cambios serán ignorados durante su funcionamiento.

- **Coordinador de sueño**

Este modo configura al módulo para funcionar como coordinador de sueño. El coordinador acepta mensajes a un módulo específico con direcciones de 16 o 64 bit y los mantiene en su buffer interno hasta que los módulos remotos despiertan y solicitan datos al coordinador. El parámetro SP del coordinador debe ser seteado con el mismo valor que los módulos remotos, para que se pueda producir la comunicación entre los ciclos de sueño.

1.1.10.3. Modo de comando

Este modo permite ingresar comandos AT al módulo XBee, para configurar, ajustar o modificar parámetros. Permite 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-CTU²² o algún microcontrolador que maneje UART y tenga los comandos guardados en memoria o los adquiera de alguna otra forma.

En la Tabla 2.1, se muestra un resumen con los comandos AT más importantes.

Tabla 2.1. Comandos AT más importantes

Comando AT	Rango	Descripción
A1	0 - 0x0F	Describe el modo de Asociación de un módulo Utilizado como Dispositivo terminal (CE=0). Por defecto 0.
A2	0 - 0x0F	Describe el modo de Asociación de un módulo utilizado como Coordinador (CE=1). Defecto=0.
AC	-	Aplica los cambios realizados explícitamente en la configuración.
AP	0 - 0x02	Habilita el modo de operación API. Defecto=0. 0 Modo API Deshabilitado. 1 Modo API habilitado. 2 Modo API habilitado con carácter de escape.
BD	0 - 0x07	Ajusta la tasa de transmisión entre el módulo y su cliente conectado a través de la interfaz serial. Para valores no-estándar revisar el manual. Defecto=3. 0 1200 1 2400 2 4800 3 9600 4 19200 5 38400 6 57600 7 115200
CC	0 - 0xFF	Establece el carácter de secuencia a ser usado entre tiempos de esperas para entrar al modo de comandos. Defecto=0x2B (carácter ASCII +)
CH	0x0B - 0x1A	Establece el canal por el cual se realiza la conexión RF entre módulos. Verificar Frecuencia de Canales del “User Guide” para configurar este parámetro. Defecto=0x0C.
CE	0 – 1	Indica el comportamiento del módulo. Defecto=0.

²² Programa de MxStream que configura y prueba módulos de radio frecuencia.

		0 Dispositivo Terminal. 1 Coordinador.
CN	-	Sale del modo de Comando
D0-D4	0 – 5	Ajusta la configuración de los pines I/O. 0 Deshabilitado. 1 -- 2 ADC. 3 Entrada Digital. 4 Salida Digital LOW.
D5	0 – 5	Mismas funciones que D0 - D4, exceptuando lo siguiente:
D6	0 – 5	1 Indicador de Asociación. Mismas funciones que D0 - D4, exceptuando lo siguiente: 1 Control de Flujo RTS. 2 No tiene conversor ADC.
D7	0 – 5	Mismas funciones que D0 - D4, exceptuando lo siguiente: 1 Control de Flujo CTS. 2 No tiene conversor ADC.
D8	0 y 3	Ajusta la configuración del pin DI-8 (pin 9). 0 Deshabilitado. 3 Entrada Digital.
DB	0x17 – 0x5C (x-1dBm)	Lee la potencia de la señal del módulo del cual provino el último paquete RF recibido.
DL	0 – 0xFFFFFFFF	Ajusta los 32 bits menos significativos para direccionamiento. Defecto = 0.
DH	0 – 0xFFFFFFFF	Ajusta los 32 bits más significativos para direccionamiento. Defecto = 0.
GT	2 – 0x0CE4 (x1ms)	Tiempo de espera antes y después de ingresar el carácter de secuencia para entrar al modo de comandos. Defecto = 0x3E8.
IA	0 – 0xFFFFFFFF	Utilizado para crear el Cable Virtual. Indica la dirección del módulo de origen de los datos. Defecto= 0xFFFFFFFF (no permite el recibo de ningún paquete para cambiar las salidas.)
ID	0 – 0xFFFF	Ajusta la dirección PAN del módulo. Defecto= 0x3332
IR	0 – 0xFFFF (x1 ms)	Ajusta la tasa de muestreo de los pines I/O. Defecto = 0.
IS	1 – 0xFF	Fuerza al módulo a leer todos sus pines I/O. Si AP=0, el resultado se retorna del siguiente modo: - Número de Muestras. - Máscara de Canal.

		<ul style="list-style-type: none"> - Datos DIO. - Datos conversores ADC (se repite por cada conversor habilitado).
IT	1 – 0xFF	Número de muestras DIO y ADC que se deben esperar, antes de transmitir. Defecto = 1.
IO	8 bits	Ajusta los niveles de las salidas digitales. Cada bits representa el nivel de los pines I/O configurados como salida.
M0-M1	0 – 0x03FF	Ajusta el ciclo de trabajo de la salida PWM0 y PWM1. Si Mn=0 (0% PWM), Mn=0x01FF (50% PWM) y si Mn=0x03FF (100% PWM). Defecto=0
MY	0 – 0xFFFF	Configura la dirección de 16 bits para el módulo. Si; My=0xFFFF o 0xFFFE, se habilita el modo de direccionamiento de 64 bit. Defecto = 0.
NB	0 – 4	<p>Ajusta la Paridad para la comunicación serial UART del módulo. Defecto =0.</p> <ul style="list-style-type: none"> 0 8 bit sin paridad o 7 bit con cualquier paridad. 1 8 bit even. 2 8 bit odd. 3 8 bit mark. 4 8 bit space.
ND	-	<p>Reporta todos los dispositivos que se encuentren en el mismo canal y en la misma PAN que el módulo. El formato de respuesta es el siguiente cuando se encuentra en el modo Transparente.</p> <ul style="list-style-type: none"> - MY (dirección de 16 bit) - SH (Serial Number High) - SL (Serial Nmuber Low). - DB (Fuerza de la señal proveniente de este módulo)
NI	String de 20 caracteres ASCII	<ul style="list-style-type: none"> - NI (Identificador del Nodo) <p>Define con un String el nodo o módulo</p>
P0-P1	0 – 2	<p>Configura el pin PWM0 y PWM1. Defecto P0 =1,</p> <p>Defecto P1=0.</p> <ul style="list-style-type: none"> 0 Deshabilitado. 1 RSSI. 2 PWM habilitado.
RE	-	Restaura los valores de los parámetros a los valores por defecto que vienen de fábrica.
SM	0 – 6	<p>Configura el modo de operación SLEEP. Defecto = 0.</p> <ul style="list-style-type: none"> 0 Deshabilitado. 1 Pin de Hibernado. 2 Pin Doze.

		3 (reservado) 4 Remoto Cyclic SLEEP. 5 Remoto Cyclic SLEEP (con pin Wake-up). 6 SLEEP Cordinador
SL	0 – 0xFFFFFFFF	Entrega los 32 bit menos significativos del Número Serial del módulo.
SH	0 – 0xFFFFFFFF	Entrega los 32 bit más significativos del Número Serial del módulo.
SP	1 – 0x68B0 (x10 ms)	Ajusta el tiempo de duración en que un módulo duerme o se mantiene en el modo SLEEP. Una vez terminado el período, busca por data entrante, si no hay nada vuelve a dormir y espera por un nuevo ciclo.
ST	1 – 0xFFFF (x 1 ms)	Ajusta el tiempo de inactividad (datos ni recibidos ni enviados ya sea por RF o serial) antes de que el módulo ingrese al modo SLEEP. Defecto = 0x1388.
T0-T7	0 – 0xFF (x 100 ms)	Tiempo de espera de apagado para los Cables Virtuales. Si luego de este tiempo no hay cambios en alguna salida I/O, éstas cambian a su valor por defecto. Defecto = 0xFF.
IU	0 – 1	Habilita o no la salida I/O UART 0 Deshabilitado. Paquetes RF recibidos no serán enviados por UART. 1 Habilitado. Paquetes RF recibidos serán enviados por UART.
VL	-	Entrega la versión del Firmware de forma Verbal. La respuesta entrega fecha de compilación de la aplicación, MAC, PHY y versión del bootloader y sus fechas de compilación.
VR	0 – 0xFFFF	Indica cual versión de firmware se encuentra actualmente en el módulo.
WR	-	Guarda en la memoria no-volátil del módulo, todos los valores de los parámetros

Para ingresar a este modo se debe esperar un tiempo dado por el comando GT (Guard Time, por defecto ATGT=0x3E84 que equivalen a 1000ms) luego ingresar +++ y luego esperar otro tiempo GT. Como respuesta el módulo entregará un *OK*. El módulo XBee viene por defecto con una velocidad de 9600 bps. En caso de no poder ingresar al modo de comandos, es posible que sea debido a la diferencia de velocidades entre el módulo y la interfaz que se comunica vía serial.

En la Figura 2.11, se muestra la sintaxis de un comando AT.

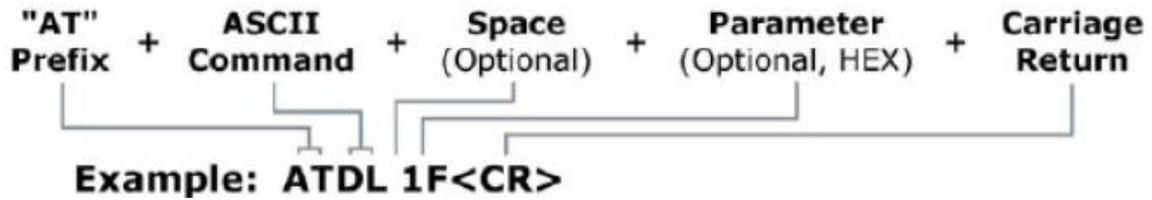


Figura 2.11. Ejemplo de Comando AT

Luego de ingresar a este modo, se debe ingresar el comando deseado para ajustar los parámetros del módulo XBEE.

En la Figura 2.12, se muestra como se modifica la dirección de origen del módulo de 16 bit (con el comando MY).



Figura 2.12. Ejemplo de 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 caracteres <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 ATCN (sale del modo de comandos) o ATAC (aplica los cambios inmediatamente). Con el comando ATWR, se guardan los cambios en la memoria no volátil del módulo, pero sólo tendrán efecto una vez ingresado el comando AC o CN.

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.

En la Figura 2.13. se muestra como se consulta por algún comando.

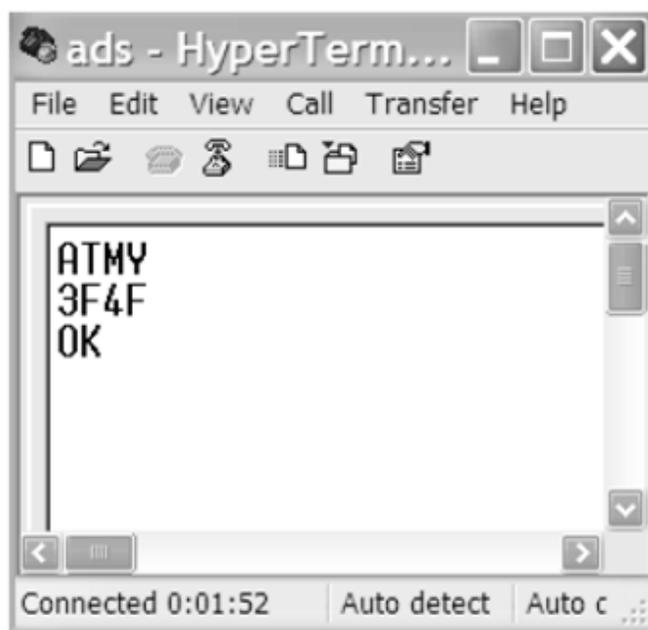


Figura 2.13. Ejemplo de lectura de parámetros

Se observa que se ingresa ATMY, donde el que módulo responde con un 3F4F, que es la dirección que tiene configurada, y luego con un OK. Otra forma de configurar el módulo por comandos AT, es ingresando varios comandos separados por *coma* (','). Esto se muestra a continuación de las dos formas.

En la Figura 2.14. se muestra la forma normal de escritura de comandos AT.

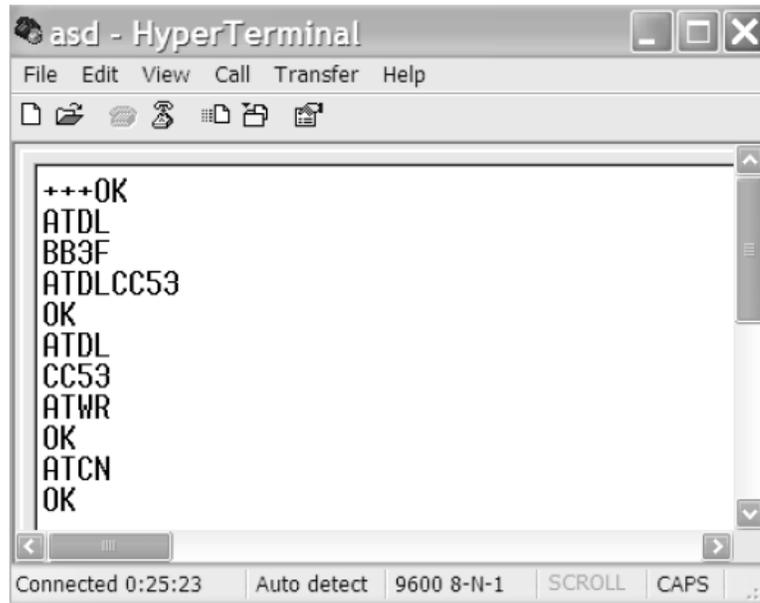


Figura 2.14. Forma normal de escribir

Se observa que luego de ingresar al modo de Comandos (+++), se pregunta por la dirección de destino (ATDL), para lo cual se tiene como respuesta la dirección 0xBB3F.

Con ello se modifica esta dirección por 0xCC53 ingresando ATDLCC53, obteniendo un OK como respuesta. Se confirma el correcto ajuste preguntando nuevamente y luego se guarda la configuración en la memoria no volátil del módulo usando ATWR, para lo cual se vuelve a obtener un OK. Posteriormente se saldrá del modo de comando utilizando ATCN obteniendo otro OK.

En la Figura 2.15, se muestra la forma abreviada de escritura de los comandos AT.

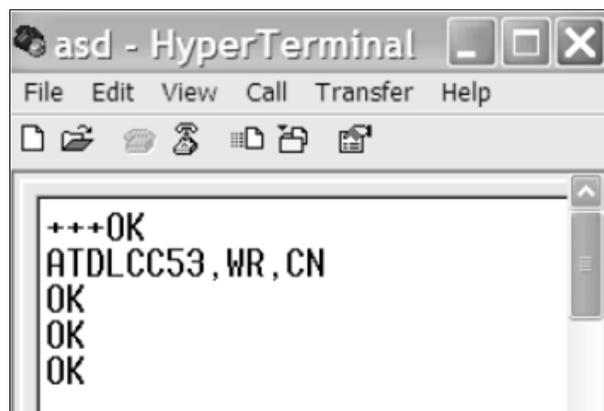


Figura 2.15. Forma abreviada

Se observa que luego de ingresar al modo de comandos, se ingresa ATDLCC35, WR, CN que indica que se ingresarán tres comandos en uno, y éstos serán ATDLCC35, ATWR y ATCN. Luego se obtendrá la respuesta para cada comando en el mismo orden en que fueron ingresados.

Además de los modos anteriores, existen otros modos referentes a lo que son la forma de transmitir la información. Estos modos son: Modo Transparente y Modo API.

1.1.10.4. Modo Transporte

En este modo todo lo que ingresa por el pin 3 (Data in), es guardado en el buffer de entrada y luego transmitido y todo lo que ingresa como paquete RF, es guardado en el buffer de salida y luego enviado por el pin 2 (Data out). El modo Transparente viene por defecto en los módulos XBee. Este modo está destinado principalmente a la comunicación punto a punto, donde no es necesario ningún tipo de control. También se usa para reemplazar alguna conexión serial por cable, ya que es la configuración más sencilla posible y no requiere una mayor configuración.

En este modo, la información es recibida por el pin 3 del módulo XBee, y guardada en el buffer de entrada. Dependiendo de cómo se configure el comando RO, se puede transmitir la información apenas llegue un carácter (RO=0) o después de un tiempo dado sin recibir ningún carácter serial por el pin 3. En ese momento, se toma lo que se tenga en el buffer de entrada, se empaqueta, es decir, se integra a un paquete RF, y se transmite. Otra condición que puede cumplirse para la transmisión es cuando el buffer de entrada se llena, esto es, más de 100 bytes de información.

En la Figura 2.16, se muestra la correspondencia del buffer en el modulo XBee.

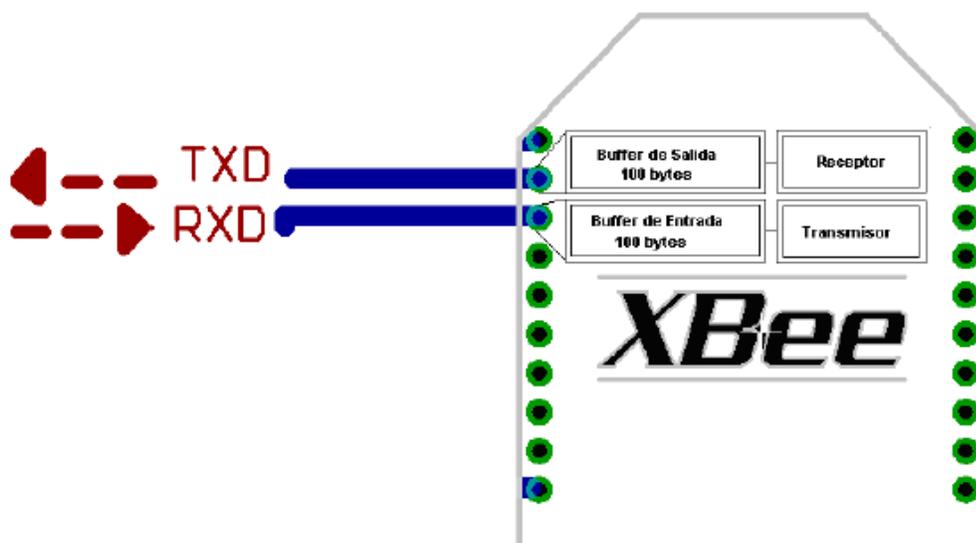


Figura 2.16. Correspondencia de Buffer

1.1.10.5. Modo de operación API

Este modo es más complejo, pero permite el uso de frames²³ con cabeceras que aseguran la entrega de los datos, al estilo TCP. Extiende el nivel en el cual la aplicación del cliente, puede interactuar con las capacidades de red del módulo.

Cuando el módulo XBEE se encuentra en este modo, toda la información que entra y sale, es empaquetada en frames, que definen operaciones y eventos dentro del módulo.

Así, un Frame de Transmisión de Información (información recibida por el pin 3 o DIN) incluye:

- Frame de información RF transmitida.
- Frame de comandos (equivalente a comandos AT).

Mientras que un Frame de Recepción de Información incluye:

- Frame de información RF recibida.
- Comando de respuesta.
- Notificaciones de eventos como Reset, Associate, Disassociate, etc.

Esta API, provee alternativas para la configuración del módulo y ruteo de la información en la capa de aplicación del cliente. Un cliente puede enviar información al módulo XBee. Estos datos serán contenidos en un frame cuya cabecera tendrá información útil referente el módulo.

Esta información además se podrá configurar, esto es, en vez de estar usando el modo de comandos para modificar las direcciones, la API lo realiza automáticamente. El módulo así enviará paquetes de datos contenidos en frames a otros módulos de destino, con información a sus respectivas aplicaciones, conteniendo paquetes de estado, así como el origen, RSSI (potencia de la señal de recepción) e información de la carga útil de los paquetes recibidos.

Entre las opciones que permite la API, se tienen:

- Transmitir información a múltiples destinatarios, sin entrar al modo de Comandos.
- Recibir estado de éxito/falla de cada paquete RF transmitido.
- Identificar la dirección de origen de cada paquete recibido.

²³ Frame, en español, esquema.

1.1.10.6. Idle

Cuando el módulo no se está en ninguno de los otros modos, se encuentra en éste. Es decir, si no está ni transmitiendo ni recibiendo, ni ahorrando energía ni en el modo de comandos, entonces se dice que se encuentra en un estado al que se le llama IDLE.

1.1.11. Técnica de modulación

Como se ha mencionado anteriormente, ZigBee se define fundamentalmente en la especificación 802.15.4, y emplea el “espectro expandido por secuencia directa” (DSSS²⁴) para la codificación, y un filtrado de compensación de media onda de “Modulación por desplazamiento de fase” (QPSK²⁵), para la modulación.

No es el objetivo principal de esta tesis profundizar en detalle sobre estos conceptos, sin embargo, se dará una breve y básica generalidad de éstos.

- Modulación para DSSS

En la banda de 2,4 GHz se utilizan variaciones en fase de una sola portadora de amplitud constante: DBPSK (Differential Binary Phase Shift Keying) y DQPSK (Differential QuadraturePhase Shift Keying).

La modulación por desplazamiento de fase o PSK (Phase Shift Keying) es una forma de modulación angular que consiste en hacer variar la fase de la portadora entre un número de valores discretos. La diferencia con la modulación de fase convencional (PM) es que mientras en ésta la variación de fase es continua, en función de la señal moduladora, en la PSK la señal moduladora es una señal digital y, por tanto, con un número de estados limitado.

Dependiendo del número de posibles fases a tomar, recibe diferentes denominaciones. Dado que lo más común es codificar un número entero de bits por cada símbolo, el número de fases a tomar es una potencia de dos. Así tendremos BPSK con 2 fases (equivalente a PAM), QPSK con 4 fases (equivalente a QAM), 8-PSK con 8 fases y así sucesivamente. A mayor número de posibles fases, mayor es la cantidad de información que se puede transmitir utilizando el mismo ancho de banda, pero mayor es también su sensibilidad frente a ruidos e interferencias.

Las modulaciones BPSK y QPSK son óptimas desde el punto de vista de protección frente a errores. Conceptualmente hablando, la diferencia entre distintos símbolos (asociados a cada fase) es máxima para la potencia y ancho de banda utilizados. No pasa lo mismo con 8-PSK, 16-PSK o superiores, para las que existen otras modulaciones más eficientes.

²⁴ Direct Sequence Spread Spectrum.

²⁵ Quadrature Phase Shift Keyed.

La gran ventaja de las modulaciones PSK es que la potencia de todos los símbolos es la misma, por lo que se simplifica el diseño de los amplificadores y etapas receptoras (reduciendo costos), dado que la potencia de la fuente es constante.

Existen dos alternativas de modulación PSK: PSK convencional, donde se tienen en cuenta los desplazamientos de fase, y PSK diferencial, en la cual se consideran las diferencias entre un salto de fase y el anterior.

Capítulo IV

Descripción del hardware

El diseño implementado tiene como razón principal el de crear una interfaz capaz de comunicar 2 dispositivos para poder transmitir información inalámbricamente, evitando el cableado, facilitando la instalación, manipulación y ahorro en la misma. Las tarjetas desarrolladas presentan características para funciones específicas.

A continuación estudiaremos cada una de las partes de las tarjetas implementadas:

4.1. Tarjeta de transmisión inalámbrica implementada

4.1.1. Etapa de Comunicación

En esta etapa se tomara en cuenta el circuito acondicionador de señal en el cual usamos el integrado XTR105; este circuito se encuentra en el Laboratorio de Electrónica de la Universidad de Piura.

La etapa de comunicación de la tarjeta respecto a la toma de temperatura se da en una sola dirección del sensor al microcontrolador.

Los distintos componentes que encontramos en esta etapa son los encargados de transmitir los datos desde el sensor al microcontrolador, acondicionando la señal recibida, mediante el integrado XTR105.

A continuación presentamos una breve descripción delo componente XTR105 usados en esta parte de la tarjeta y de su funcionamiento:

El sensor de temperatura utilizado se basa en la variación de la resistencia de un conductor con la temperatura. En un conductor, el número de electrones disponibles para la conducción no cambia apreciablemente con la temperatura. Pero si esta aumenta, las vibraciones de los átomos alrededor de sus posiciones de equilibrio son mayores y así dispersan más eficazmente los electrones, reduciendo su velocidad media. Esto implica un coeficiente de temperatura positivo, es decir, un aumento de la resistencia con la temperatura.

Las señales obtenidas por los sensores, se transmiten a un receptor, para esto se utiliza el XTR105, el cual es un transmisor de corriente 4-20mA con fuentes de precisión de corriente, el cual tiene como ventaja el emplear 4mA para el valor de cero, ya que permite distinguirlo de un circuito abierto (0mA). Este circuito integrado es de 14 terminales como se observa en la Figura 4.1, que funcionalmente se puede representar según se muestra en la Figura 4.2.

En la Figura 4.1, podemos ver la configuración de los pines del integrado antes descrito:

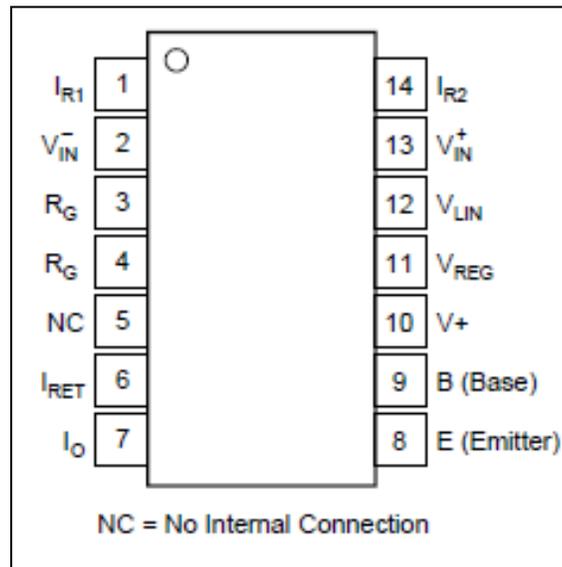


Figura 4.1. Vista de planta del integrado XTR105

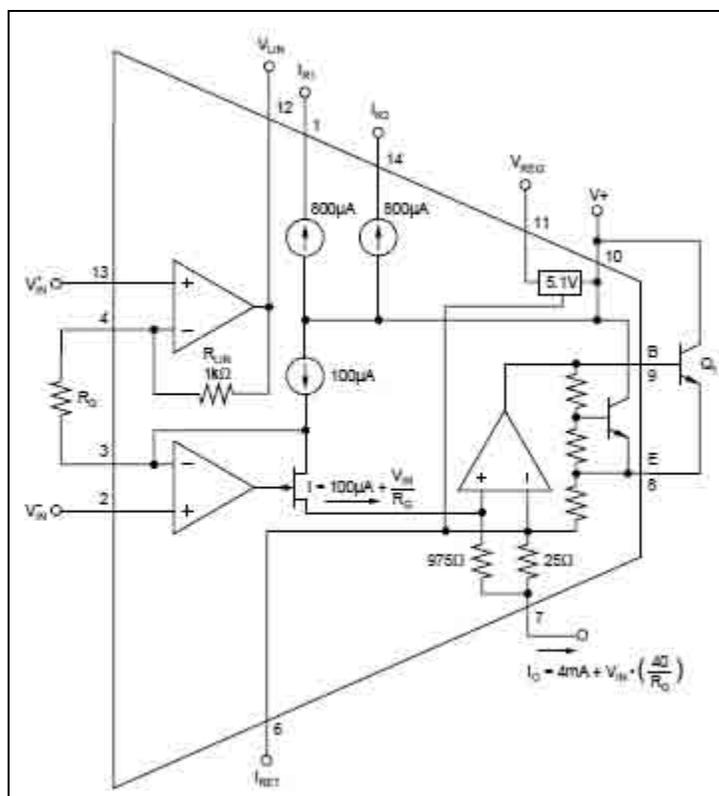


Figura 4.2. Diagrama de bloques funcional del XTR105

La ganancia del amplificador instrumentación puede configurarse para un amplio rango de medidas temperatura o presión, es por eso que se ha utilizado en esta tesis.

Algunas características del circuito integrado son:

- La etapa de entrada está formada por un amplificador de instrumentación con ganancia ajustable.
- Bajo desajuste de error, esto permite utilizarlo en muchas aplicaciones.
- El circuito cuenta con dos fuentes de corriente (I_{R1} , I_{R2}) de $800 \mu\text{A}$ cada una.
- La alimentación es unipolar en un amplio margen de 7.5 a 36V.
- Dispone de ajuste de offset opcional con un potenciómetro externo.
- Operación con RTDs de dos y tres hilos.
- Bajo ruido en la corriente de salida.

- Si se usa un transistor externo (opcional), este queda conectado en paralelo con uno interno. De esta forma gran parte de la corriente de salida procede directamente de Vcc a través de Q1 (ver Figura 4.2), reduciendo el auto calentamiento del XTR105 y aumentando su precisión al disminuir las derivas térmicas.

En la Figura 4.3, se muestra el diagrama básico de conexión para el XTR105 con una RTD de dos hilos.

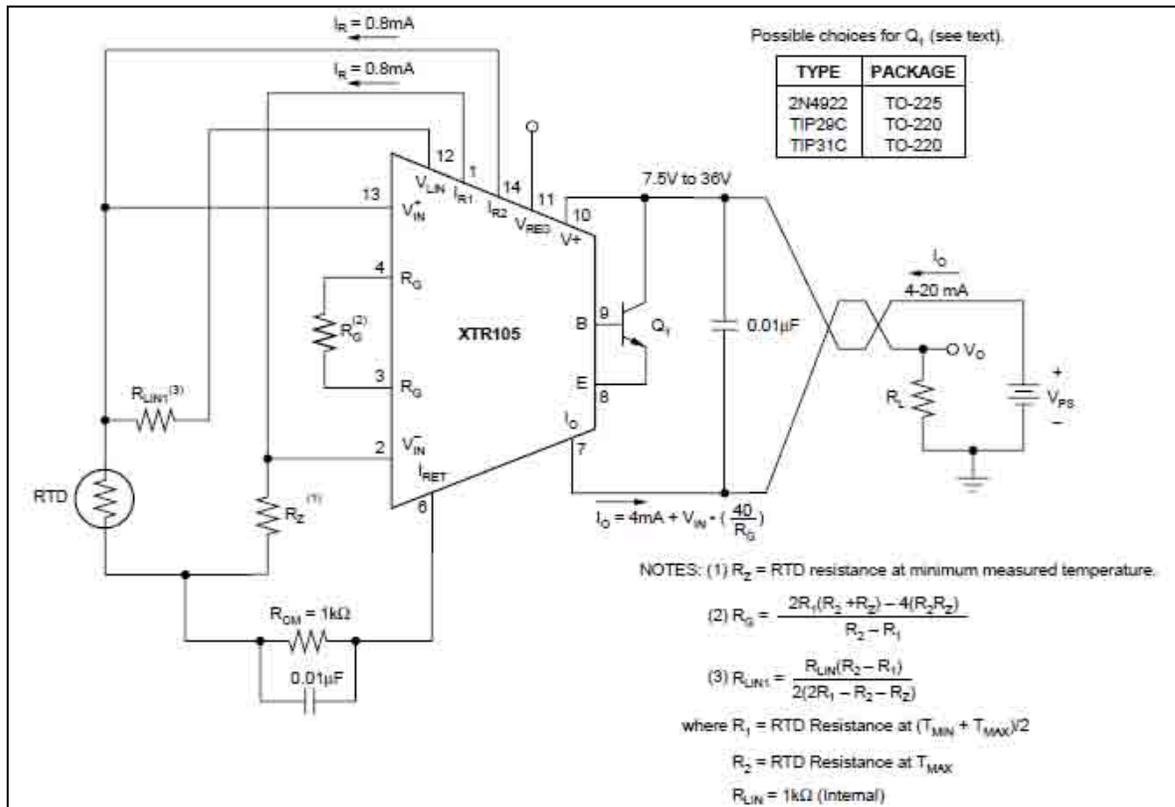


Figura 4.3. Diagrama básico para un RTD de dos hilos

La fuente de alimentación V_{ps} proporciona la alimentación a todo el circuito. La corriente de salida puede ser medida en serie con la resistencia de carga R_L .

Las dos fuentes de corriente manejan la RTD y en R_z se realiza el ajuste de cero, R_z debe ser del mismo valor de la RTD a la temperatura mínima que se pretenda medir para que a esta temperatura la corriente sea 4mA.

El amplificador de instrumentación mide la diferencia de voltaje entre la RTD y R_z . Los condensadores se utilizan para filtrar el ruido de alta frecuencia.

Los sensores para medir temperatura son fiables pero no lineales y con la adición de una o dos resistencias externas, R_{LIN1} y R_{LIN2} , es posible compensar la mayor parte de esta no linealidad causando 40:1 en la mejora de la linealidad sobre la salida.

En la Figura 4.3, el RTD puede ser ubicado remotamente, extendiendo las dos conexiones del RTD. Con esta conexión remota de 2 hilos, la resistencia de la línea nos dará un error. Este error puede ser corregido parcialmente por un ajuste en los valores de R_Z , R_G , y R_{LIN1} .

En la Figura 4.4, se muestra el diagrama básico de conexión para el XTR 105 con una RTD de tres hilos.

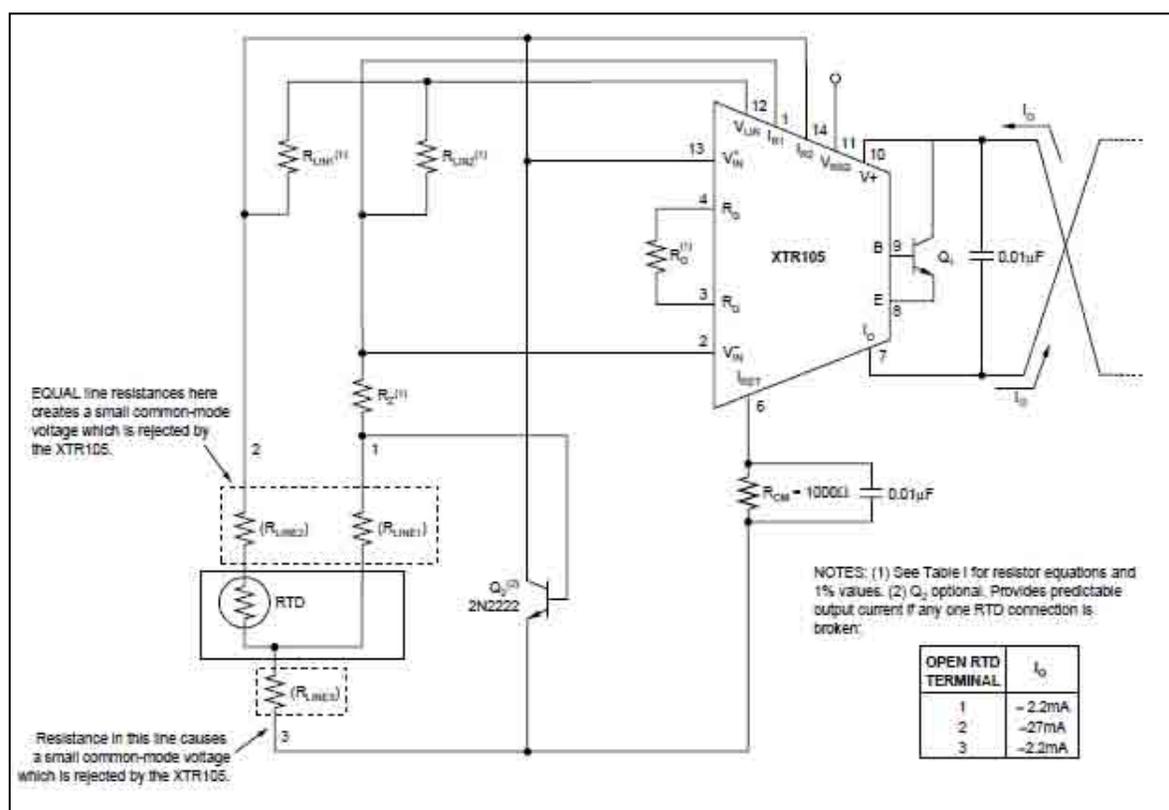


Figura 4.4. Diagrama básico para un RTD de tres hilos

Un mejor método para la ubicación remota del RTD es la conexión de 3 hilos para el RTD como se muestra en la Figura 4.4. Este circuito ofrece una mejora en la precisión. La corriente de R_Z pasa a través del tercer hilo del RTD. Asumiendo la resistencia de la línea es igual en las líneas 1 y 2 del RTD, esto produce un pequeño voltaje de modo-común, que es rechazado por el XTR105. La segunda resistencia, R_{LIN2} , se requiere para la linealización.

Nótese que aunque las conexiones para el circuito de 2 y 3 hilos para el RTD son muy parecidas, el ajuste-ganancia de la resistencia, R_G , tienen ecuaciones diferentes:

2 hilos:

$$R_G = \frac{2R_1(R_2 + R_Z) - 4(R_2 R_Z)}{R_2 - R_1}$$

3 hilos:

$$R_G = \frac{2(R_2 - R_Z)(R_1 - R_Z)}{R_2 - R_1}$$

Donde:

R_Z = Resistencia RTD en la T_{MIN}

R_1 = Resistencia RTD en la $(T_{MIN} + T_{MAX})/2$

R_2 = Resistencia RTD en la T_{MAX}

4.1.2. Etapa de Alimentación

A continuación en la Figura 4.5, se presenta el circuito que representa la etapa de Alimentación en nuestra tarjeta de transmisión implementada:

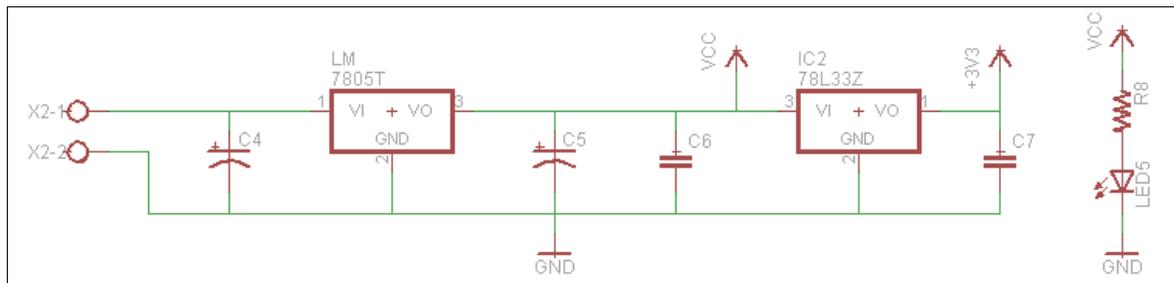


Figura 4.5. Circuito de la Etapa de Alimentación

Los componentes usados para esta parte de la tarjeta son descritos a continuación:

- **LM7805:**

Es un regulador de voltaje de tres terminales, capaz de entregar corriente de hasta 1 A en su terminal de salida; el voltaje mínimo que puede tener en su pin de entrada es de 6VDC y el máximo es de 35VDC, el voltaje en su terminal de salida oscila entre 4.8 y 5.2 VDC. Para la tarjeta desarrollada, el voltaje necesitado es de 5VDC.

- **78L33:**

Este es un regulador de voltaje de tres terminales; este es un regulador lineal de la familia 78XX. Funciona con cualquier fuente de 5 VDC o más. Regula a 3.3 VDC, que es lo que se necesita para poder alimentar a nuestro modulo de transmisión XBee.

- **Condensadores**

Sirven para eliminar ruidos y distorsiones de la señal externa de alimentación de nuestro circuito. Gracias a ellos tenemos siempre el voltaje con las características necesarias como para asegurar un óptimo funcionamiento del microprocesador.

- **Resistencias y Diodo LED (Light Emitting Diode)**

Como podemos apreciar en el diagrama, la resistencia y el respectivo diodo están puestos en paralelo a la carga que se va alimentar, por lo que su función es la de señalar los instantes de funcionamiento de la Etapa de Alimentación.

4.1.3. Etapa de Programación

La programación de las funciones se realizará en el microcontrolador PIC16F873, el cual será estudiado más adelante.

4.1.4. Etapa de Transmisión

La transmisión de los datos se realizara por el modulo XBee, el cual será estudiado más adelante.

4.1.5. Listado de componentes

A continuación se presenta la Tabla 4.1, en la que podemos apreciar los distintos componentes de la tarjeta de transmisión de datos implementada:

Tabla 4.1. Elementos usados en la tarjeta de transmisión de datos

Elementos	Cantidad
Bornera de 2 pines	3
Regulador 7805	1
Regulador 78L33	1
Resistencias de 330 Ω	2
Resistencias de 1 kΩ	2
Condensadores cerámicos 104	3
Condensadores cerámicos 33	2
Condensador de 100uF 25V	1
Condensador de 10uF 25V	1
Pulsadores	2
Cristal	1
Diodo LED	3
Socket 7-2	1
Socket 14-2	1
Pines para XBee	20
Pines	8

4.2. Tarjeta de recepción inalámbrica implementada

4.2.1. Etapa de Comunicación

La etapa de comunicación de la tarjeta presenta para este caso que estamos estudiando una comunicación bidireccional (Rx-Tx), mediante el puerto serial se puede enviar o recibir información.

Los componentes que encontramos en esta etapa se encargan de recibir los datos enviados por algún dispositivo, en este caso el modulo XBee que recibe los datos medidos de temperatura y los comunica gracias al 74LS04 por serial hacia el procesador, en este caso una computadora. Siendo la función del 74LS04, adaptar una señal de 0 – 5V a una señal de 0 – 3V.

A continuación presentamos una breve descripción de los componentes usados en esta parte de la tarjeta y de su funcionamiento:

El primer componente que describiremos es el integrado 74LS04. Este es un integrado de 14 pines, de los cuales 2 son para alimentación y tierra, los otros 12 se usan como entradas y salidas; este integrado es un inversor lógico o negador lógico que cuenta con 6 inversores. El 74LS04 sirve como interfaz de transmisión y recepción para las señales Rx, Tx, DTR y RTS.

Cuando el modulo XBee transmita los datos recibidos inalámbricamente, gracias al 74LS04 se puede llevar a cabo la comunicación serial con el procesador; como se ve en la Figura 4.6, la comunicación entre el XBee y la PC se realiza gracias a este integrado.

Debemos tener en cuenta que este integrado está trabajando a 3.3V de alimentación, siendo esta alimentación lo que permite la conexión entre los niveles de la PC y XBee, ya que trabajan a diferentes voltajes. El cable que se utiliza entre la placa receptora y la PC es un cable USB-SERIAL (HL-340), se debe instalar el driver de este cable, el cual viene al comprarlo o se encuentra en internet.

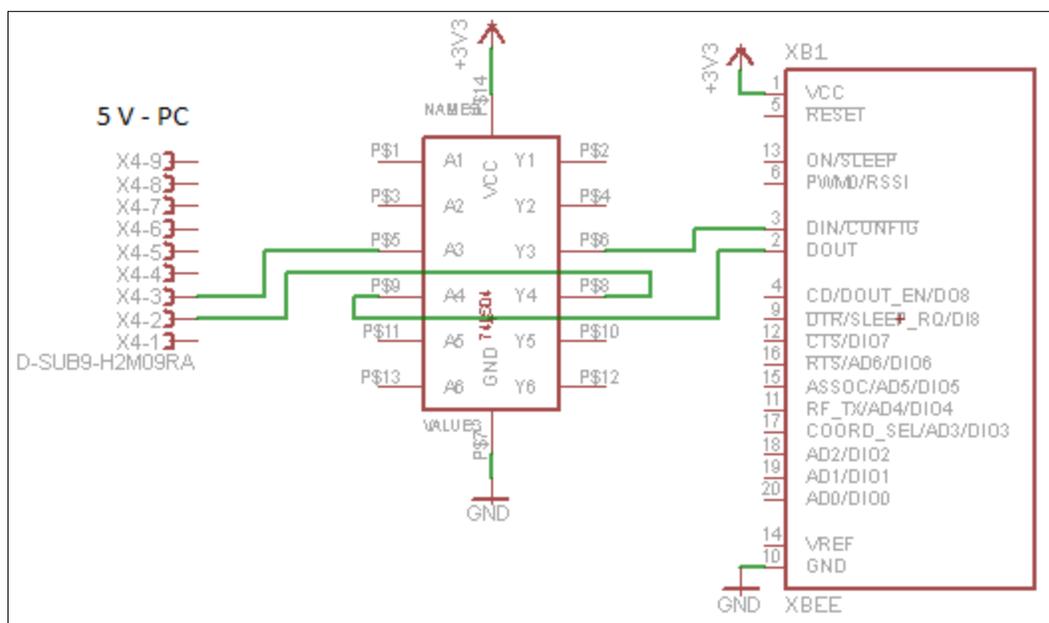


Figura 4.6. Conexión mediante el 74LS04 entre el XBee y PC para Rx y Tx

Los pines del integrado presentan el siguiente funcionamiento:

- **VCC:** Voltaje de alimentación.
- **GND:** Tierra
- **1A, 2A, 3A, 4A, 5A, 6A:** Entradas del NOT.
- **1Y, 2Y, 3Y, 4Y, 5Y, 6Y:** Salidas del NOT.

Existen unos integrados como el SP3203E o el MAX3232, los cuales funcionan en un rango de 3.3V a 5.5V de alimentación; estos trabajan bajo el protocolo de comunicación RS-232, de esta manera no habría problemas para la comunicación entre el XBee y la PC.

A continuación daremos una pequeña información acerca del SP3203E ya que es menos conocido que le MAX3232.

En la Figura 4.7 podemos ver la configuración de pines del integrado antes descrito:

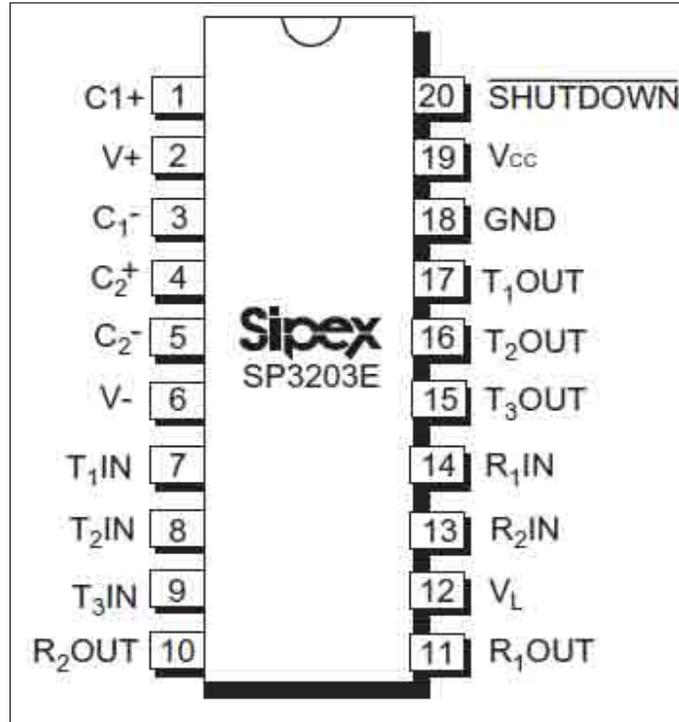


Figura 4.7. Vista en planta del integrado SP3203E

Los pines del integrado presentan el siguiente funcionamiento:

- **C1+**: Terminal positivo del doblador de voltaje de carga del condensador C1.
- **V+**: Salida generada regulada a +5.5V por la bomba de carga..
- **C1-**: Terminal negativo del doblador de voltaje de carga del condensador C1.
- **C2+**: Terminal positivo del doblador de voltaje de carga del condensador C2.
- **C2-**: Terminal negativo del doblador de voltaje de carga del condensador C2.
- **V-**: Salida generada regulada a -5.5V por la bomba de carga.
- **T1_{in}, T2_{in}, T3_{in}, R1_{out}, R2_{out}**: Conexiones a niveles de voltaje TTL o CMOS.
- **T1_{out}, T2_{out}, T3_{out}, R1_{in}, R2_{in}**: Conexiones a niveles de voltaje del protocolo RS-232.
- **V_L**: Selección del voltaje de alimentación para los niveles lógicos.

- **VCC:** Voltaje de alimentación entre +3.0V a +5.5V.}
- **GND:** Tierra.
- **SHUTDOWN:** Aplicar a la lógica baja a cerrar los conductores y bomba de carga.

4.2.2. Etapa de Alimentación

A continuación en la Figura 4.8, se presenta el circuito que representa la etapa de Alimentación en nuestra tarjeta de recepción implementada:

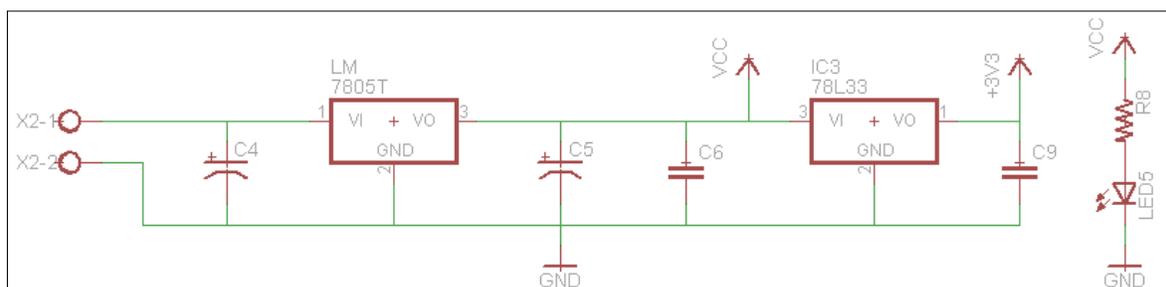


Figura 4.8. Circuito de la Etapa de Alimentación

Los componentes usados para esta parte de la tarjeta son descritos a continuación:

- **LM7805:**

Es un regulador de voltaje de tres terminales, capaz de entregar corriente de hasta 1 A en su terminal de salida; el voltaje mínimo que puede tener en su pin de entrada es de 6VDC y el máximo es de 35VDC, el voltaje en su terminal de salida oscila entre 4.8 y 5.2 VDC. Para la tarjeta desarrollada, el voltaje necesitado es de 5VDC.

- **78L33:**

Este es un regulador de voltaje de tres terminales; este es un regulador lineal de la familia 78XX. Funciona con cualquier fuente de 5 VDC o más. Regula a 3.3 VDC, que es lo que se necesita para poder alimentar a nuestro modulo de transmisión XBee.

- **Condensadores**

Sirven para eliminar ruidos y distorsiones de la señal externa de alimentación de nuestro circuito. Gracias a ellos tenemos siempre el voltaje con las características necesarias como para asegurar un óptimo funcionamiento del microprocesador.

- **Resistencias y Diodo LED (Light Emitting Diode)**

Como podemos apreciar en el diagrama, la resistencia y el respectivo diodo están puestos en paralelo a la carga que se va alimentar, por lo que su función es la de señalar los instantes de funcionamiento de la Etapa de Alimentación.

4.2.3. Etapa de Recepción

La recepción de los datos se realizara por el modulo XBee, el cual será estudiado más adelante.

4.2.4. Lista de Componentes

A continuación se presenta la Tabla 4.2, en la que podemos apreciar los distintos componentes de la tarjeta de recepción de datos implementada:

Tabla 4.2. Elementos usados en la tarjeta de recepción de datos

Elementos	Cantidad
Bornera de 2 pines	2
Regulador 7805	1
Regulador 78L33	1
Resistencias de 330 Ω	2
Resistencias de 1 kΩ	1
Condensadores cerámicos 104	2
Condensador 100uF 25V	1
Condensador 10uF 25V	1
Pulsadores	1
Diodo LED	3
Socket 7-2	1
Pines para XBee	20
Conector serial	1

4.3. PIC16F873

Existe una gran variedad de modelos de microcontroladores, que poseen una gran versatilidad, velocidad, bajo costo, bajo consumo de potencia y gran disponibilidad de herramientas para su programación.

A continuación se verán las diversas características del microcontrolador “PIC16F873”. También se tratarán las funciones básicas como lo es la configuración para la entrada y salida de información.

La Figura 4.9, nos muestra el diagrama de bloques del PIC16F873.

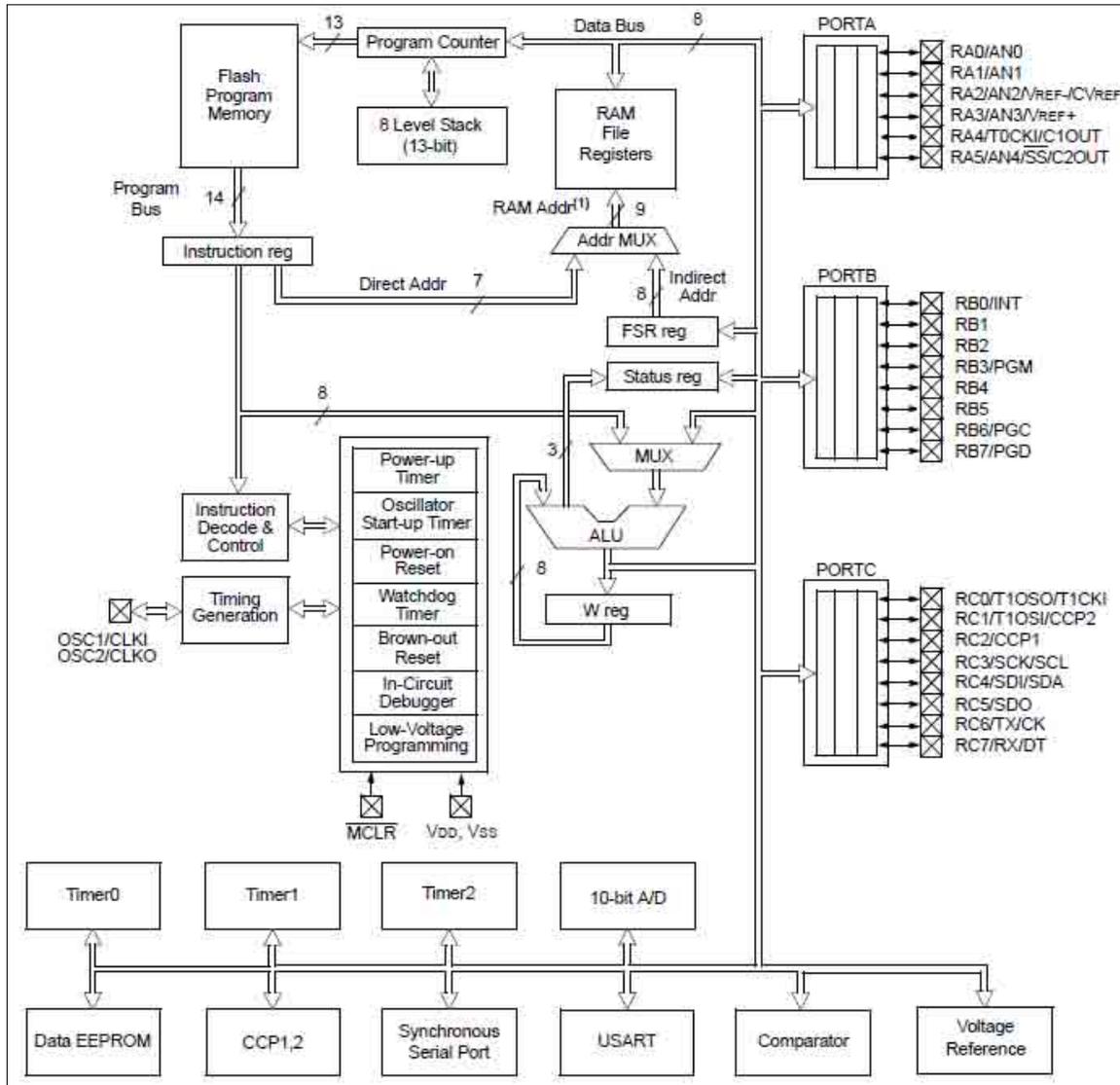


Figura 4.9. Diagrama de Bloques del PIC16F873

4.3.1. Descripción del PIC16F873

El PIC16F873 es un microcontrolador de Microchip, el cual tiene las características que se muestran en la Tabla 4.3.

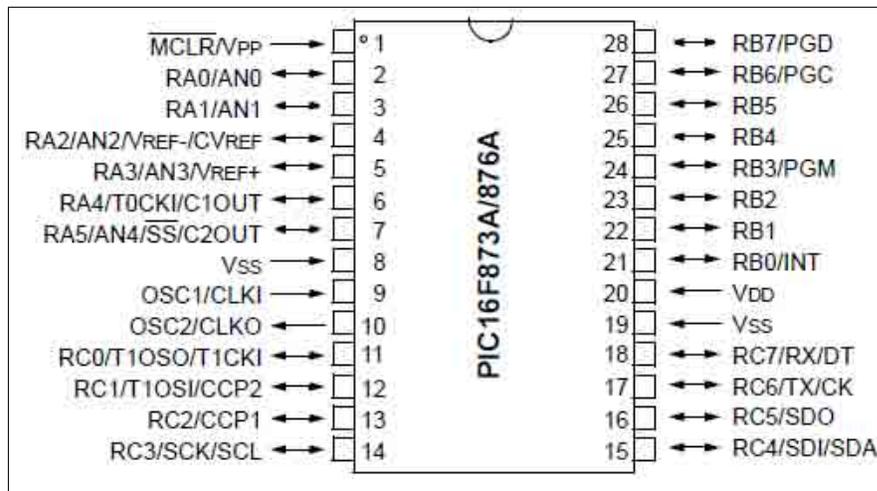
Tabla 4.3. Características del PIC16F873

Características	Descripción
Frecuencia de operación	20MHz
Memoria Flash de programa (palabra de 14 bits)	4k
Memoria de datos (bytes)	192
Memoria de datos EEPROM (bytes)	128
Interrupciones	13
Puertos de E/S	Puertos A, B,C
Temporizadores	3
Módulos de Captura/Comparación/PWM	2
Comunicación serial tipo	MSSP, USART
Módulo Análogo-Digital (10 bits)	5 canales de entrada
Conjunto de instrucciones	35

Debida a las características podemos ver que el PIC es muy útil para el desarrollo de diferentes aplicaciones tales como control y procesamiento digital de señales.

4.3.2. Entradas y salidas digitales

En la Figura 4.10, se presenta el encapsulado del PIC16F873 de 28 pines:

**Figura 4.10 Vista en planta de la configuración de pines del PIC16F873**

La Tabla 4.4 que se muestra a continuación, nos muestra la configuración predeterminada que tiene el PIC16F873.

Tabla 4.4. Configuración de los pines del PIC16F873

Nombre del pin	Pin	Tipo	Descripción
OSC1/CLKIN	9	E	Entrada de oscilador de cristal.
OSC2/CLKOUT	10	S	Salida de oscilador de cristal.
MCLR/VPP/THV	1	E/S	Reset o entrada de voltaje de programación.
RA0/AN0	2	E/S	PUERTO A es un puerto bidireccional de E/S. RA0 También puede ser entrada analógica 0. RA1 También puede ser entrada analógica 1. RA2 También puede ser entrada analógica 2 o referencia analógica de voltaje negativo. RA3 También puede ser entrada analógica 3 o referencia analógica de voltaje positivo. RA4 Puede ser también la entrada de reloj de módulo Temporizador 0. RA5 También puede ser entrada analógica 4 o esclavo en la selección de puertos serial síncrono.
RA1/AN1	3	E/S	
RA2/AN2/VREFF	4	E/S	
RA3/AN3/VREFF+	5	E/S	
RA4/TOCKI	6	E/S	
RA5/SS/AN4	7	E/S	
RB0/INT	21	E/S	
RB1, RB2	22-23	E/S	
RB3, PGM	24	E/S	
RB4, RB5	25-26	E/S	
RB6/PGC	27	E/S	
RB7/PGD	28	E/S	
RC0/T1OSO/T1CKI	11	E/S	PUERTO C es un puerto bidireccional de E/S. RC0 Puede ser la salida del oscilador Timer1 o entrada de reloj de Timer1. RC1 Puede ser la entrada del oscilador Timer1 o entrada de Captura2/salida de Captura2/PWM2. RC2 entrada Captura1/salida Comparado1/salida PWM1. RC3 Puede ser entrada reloj de reloj de sincronía serial. RC4 Puede ser entrada de dato SPI (en modo SPI). RC5 Puede ser salida de dato SPI (en modo SPI). RC6 Puede ser pin de transmisión USART. RC7 Puede ser pin de recepción USART.
RC1/T1OSI/CCP2	12	E/S ST	
RC2/CCP1	13	E/S	
RC3/SCK/SCL	14	E/S	
RC4	15	E/S	
RC5	16	E/S	
RC6/TX/CK	17	E/S	
RC7/RX/DT	18	E/S	
VSS	8,19		Referencia de tierra.
VDD	20		Fuente positiva.

Leyenda: E: entrada, S: Salida, ST: entrada Schmitt Trigger.

4.3.3. Organización de memoria

Hay tres bloques de memoria en este PIC los cuales son: memoria FLASH de programa, memoria de Datos (RAM) y memoria EEPROM de datos. Debido a las aplicaciones que se tratan, solo es necesario conocer la memoria de Datos (RAM).

4.3.3.1. Memoria de datos (RAM)

La memoria de datos esta particionada en múltiples bancos de los cuales contiene Registro de Propósito General y Registros de Funciones Especiales. Los bits RP1 (STATUS(6)) y RP0 (STATUS(5)) son usados para la selección del banco.

Tabla 4.5. Bits para la selección de banco

RP1:RP0	Banco
00	0
01	1
10	2
11	3

Cada banco se extiende hasta la dirección 7Fh (128 bytes). La parte baja de cada banco es reservada para los Registros de Funciones Especiales. Los Registros de Propósito General pueden ser accedados cada uno directamente, o indirectamente.

En la Figura 4.11, se muestra la conformación de los bancos.

File Address	File Address	File Address	File Address
Indirect addr. ⁽¹⁾ 00h	Indirect addr. ⁽¹⁾ 80h	Indirect addr. ⁽¹⁾ 100h	Indirect addr. ⁽¹⁾ 180h
TMR0 01h	OPTION_REG 81h	TMR0 101h	OPTION_REG 181h
PCL 02h	PCL 82h	PCL 102h	PCL 182h
STATUS 03h	STATUS 83h	STATUS 103h	STATUS 183h
FSR 04h	FSR 84h	FSR 104h	FSR 184h
PORTA 05h	TRISA 85h		
PORTB 06h	TRISB 86h	PORTB 106h	TRISB 186h
PORTC 07h	TRISC 87h		
PORTD ⁽¹⁾ 08h	TRISD ⁽¹⁾ 88h		
PORTE ⁽¹⁾ 09h	TRISE ⁽¹⁾ 89h		
PCLATH 0Ah	PCLATH 8Ah	PCLATH 10Ah	PCLATH 18Ah
INTCON 0Bh	INTCON 8Bh	INTCON 10Bh	INTCON 18Bh
PIR1 0Ch	PIE1 8Ch	EEDATA 10Ch	EECON1 18Ch
PIR2 0Dh	PIE2 8Dh	EEADR 10Dh	EECON2 18Dh
TMR1L 0Eh	PCON 8Eh	EEDATH 10Eh	Reserved ⁽²⁾ 18Eh
TMR1H 0Fh		EEADRH 10Fh	Reserved ⁽²⁾ 18Fh
T1CON 10h			
TMR2 11h	SSPCON2 91h		
T2CON 12h	PR2 92h		
SSPBUF 13h	SSPADD 93h		
SSPCON 14h	SSPSTAT 94h		
CCPR1L 15h			
CCPR1H 16h			
CCP1CON 17h			
RCSTA 18h	TXSTA 98h		
TXREG 19h	SPBRG 99h		
RCREG 1Ah			
CCPR2L 1Bh			
CCPR2H 1Ch	CMCON 9Ch		
CCP2CON 1Dh	CVRCON 9Dh		
ADRESH 1Eh	ADRESL 9Eh		
ADCON0 1Fh	ADCON1 9Fh		
General Purpose Register 96 Bytes	General Purpose Register 96 Bytes	accesses 20h-7Fh	accesses A0h - FFh
Bank 0 7Fh	Bank 1 FFh	Bank 2 17Fh	Bank 3 1FFh

Figura 4.11. Mapa de los bancos del PIC16F873

4.3.4. Puertos de entrada y salida

Los PICs tienen la característica de que sus pines pueden ser todos configurados de acuerdo a la necesidad de la aplicación, es decir, que los pines de un mismo puerto pueden ser usados unos como entradas y otros como salidas.

Además, algunos pines E/S de los puertos son multiplexados a una función alternativa de características periféricas. En general, cuando una función de estas es habilitada, ese pin tal vez no pueda ser usado como un pin de propósito E/S.

4.3.4.1. Puerto A y el registro TRISA

El puerto A es un puerto bidireccional con un ancho de 6 bits. La correspondiente dirección de datos es el registro TRISA. Al puerto A le corresponde la dirección 05h del banco 0, en tanto que al registro TRISA le corresponde la misma dirección pero del banco 1. Si queremos que el puerto A funcione como entrada de datos debemos poner los correspondientes bits del registros TRISA en 1, en cambio, si queremos que dicho puerto funcione como salida debemos colocar los del registro TRISA a 0.

4.3.4.2. Puerto B y el registro TRISB

El puerto B es un puerto bidireccional con un ancho de 8 bits. LA correspondiente dirección de datos es el registro TRISB. Al puerto B le corresponde la dirección 06h del banco 0, en tanto que al registros TRISB le corresponde la misma dirección pero del banco 1.

La configuración del puerto B se realiza de la misma forma que el puerto A, solo que ahora se manipula el registro TRISB.

4.3.4.3. Puerto C y el registro TRISC

El puerto C es un puerto bidireccional con un ancho de 8 bits. La correspondiente dirección de datos es el registro TRISC. Al puerto A le corresponde la dirección 07h del banco 0, en tanto que al registro TRISC le corresponde la misma dirección pero del banco 1.

La configuración del puerto C se realiza de la misma forma que el puerto A, solo que ahora se manipula el registro TRISC.

4.3.5. Convertidor Analógico Digital

Convertir una señal analógica a digital es una de las ventajas de este microcontrolador. El PIC16F873 cuenta con un módulo llamado “Convertidor Analógico a Digital (A/D)” para poder efectuar esta actividad.

Los sensores son capaces de mandar señales analógicas que cambian con el tiempo, estas señales son de un voltaje que varía normalmente de 0 a 5V. Esta es la señal que recibe el

convertidor A/D donde luego es procesada para convertirla a digital como se puede apreciar en la Figura 4.12:

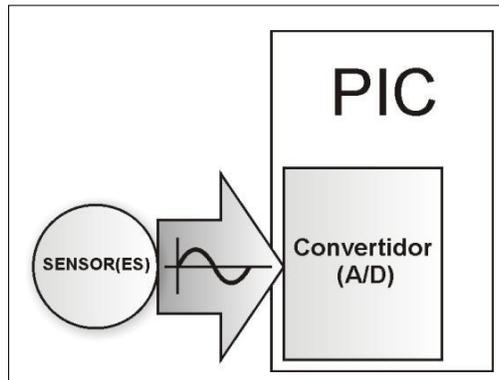


Figura 4.12. Esquema de la adquisición de la señal Analógica

Este módulo convertidor (A/D) tiene 5 entradas o canales. La entrada analógica carga una muestra y la mantiene en un capacitor. La salida del muestreo y la retención en el capacitor es la entrada al convertidor.

El convertidor entonces genera un resultado digital del nivel analógico por el método de aproximaciones sucesivas. La conversión Analógico-Digital de la entrada analógica resulta en un correspondiente número de 10 bits. El módulo A/D tiene entradas de referencia de alto voltaje (V_{DD}) y bajo voltaje (V_{SS}). Este módulo tiene la característica de que puede operar mientras el PIC se encuentra en el modo de bajo consumo de voltaje (SLEEP mode).

El módulo de conversión A/D está formado por cuatro registros, Estos registros son:

- Registro de resultado parte alta (ADRESH).
- Registro de resultado parte baja (ADRESL).
- Registro de control0 (ADCON0).
- Registro de control1 (ADCON1).

El registro ADCON0, se muestra en la Figura 4.13, controla la operación del módulo A/D. El registro de control ADCON1 se muestra en la Figura 4.14, este configura las funciones de los pines del puerto. Los pines del puerto pueden ser configurados como entradas analógicas (RA3 también puede ser la referencia de voltaje) o como E/S digitales.

R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	U-0	R/W-0
ADCS1	ADCS0	CHS2	CHS1	CHS0	GO/DONE	—	ADON
bit 7							bit 0
bit 7-6 ADCS1:ADCS0: Bits de selección de reloj de conversión							
ADCON1 <ADCS2>		ADCON0 <ADCS1:ADCS0>		Clock Conversion			
0		00		Fosc/2			
0		01		Fosc/8			
0		10		Fosc/32			
0		11		Frc (clock derived from the internal A/D RC oscillator)			
bit 5-3 CHS2:CHS0: Bits de selección de canal analógico							
000 = Channel 0 (AN0)							
001 = Channel 1 (AN1)							
010 = Channel 2 (AN2)							
011 = Channel 3 (AN3)							
100 = Channel 4 (AN4)							
bit 2 GO/DONE: Bits de estado de conversión							
When ADON = 1:							
1 = Conversión en progreso							
0 = Conversión terminada (Reestablecido automático por hardware)							
bit 1 Unimplemented: Read as '0'							
bit 0 ADON: Bits de encendido							
1 = A/D Módulo está operando							
0 = A/D Módulo está en bajo consumo de corriente							

R = bit leíble
W = bit escribible
U = bit no implementado leído como 0

Figura 4.13. Registro de control ADCON0

R/W-0	R/W-0	U-0	U-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
ADFM	ADCS2	—	—	PCFG3	PCFG2	PCFG1	PCFG0
bit 7				bit 0			

R = bit leible
W = bit escribible
U = bit no implementado leido como 0

bit 7 **ADFM: A/D Selección del formato de resultado**
1 = Justificación a la derecha. Los 6 más significativos de ADRESH son leídos como 0
0 = Justificación a la izquierda. Los 6 menos significativos de ADRESL son leídos como 0

bit 6 **ADCS2: A/D Bits de selección de reloj de conversión**

ADCON1 <ADCS2>	ADCON0 <ADCS1:ADCS0>	Clock Conversion
0	00	Fosc/2
0	01	Fosc/8
0	10	Fosc/32
0	11	Frc (clock derived from the internal A/D RC oscillator)

bit 5-4 **No implementados leídos como 0**

bit 3-0 **PCFG3:PCFG0: A/D Bits para la configuración del puerto**

PCFG <3:0>	AN4	AN3	AN2	AN1	AN0	VREF+	VREF-	C/R
0000	A	A	A	A	A	VDD	VSS	8/0
0001	A	VREF+	A	A	A	AN3	VSS	7/1
0010	A	A	A	A	A	VDD	VSS	5/0
0011	A	VREF+	A	A	A	AN3	VSS	4/1
0100	D	A	D	A	A	VDD	VSS	3/0
0101	D	VREF+	D	A	A	AN3	VSS	2/1
011x	D	D	D	D	D	—	—	0/0
1000	A	VREF+	VREF-	A	A	AN3	AN2	6/2
1001	A	A	A	A	A	VDD	VSS	6/0
1010	A	VREF+	A	A	A	AN3	VSS	5/1
1011	A	VREF+	VREF-	A	A	AN3	AN2	4/2
1100	A	VREF+	VREF-	A	A	AN3	AN2	3/2
1101	D	VREF+	VREF-	A	A	AN3	AN2	2/2
1110	D	D	D	D	A	VDD	VSS	1/0
1111	D	VREF+	VREF-	D	A	AN3	AN2	1/2

A = Entrada analógica
D = Digital E/S
C/R = # de canal de entrada analógica/# de voltaje de referencia A/D

Figura 4.14. Registro de control ADCON1

Los registros ADRESH:ADRESL, contienen los 10 bits del resultado de la conversión A/D. Cuando el proceso de conversión A/D esta completo el resultado es cargado en este par de registros, el bit GO/DONE (ADCON0(2)) es limpiado.

Después de que el módulo A/D ha sido configurado como se desea, la selección del canal debe ser realizada antes de iniciar la conversión. Los canales analógicos deben tener sus correspondientes bits TRIS seleccionados como entrada.

En los siguientes pasos se muestra como realizar la conversión:

1. Configuración del módulo A/D:

- Seleccionar los canales de entrada, voltaje de referencia y E/S digitales (ADCON1).
 - Seleccionar el canal de entrada A/D (ADCON0).
 - Seleccionar reloj de conversión (ADCON0).
 - Encender el módulo A/D (ADCON0).
2. Espera el tiempo requerido de adquisición.
 3. Iniciar conversión.
 4. Espera el proceso de conversión por:
- Limpieza del bit GO/DONE (ADCON0).
5. Leer el resultado en el par de registros (ADRESH:ADRESL).
 6. Para la siguiente conversión repita el paso 1 e inicie la conversión.

Selección del reloj de Conversión A/D: La fuente de reloj para la conversión A/D es seleccionada por software. Las cuatro posibles opciones son:

- $2T_{OSC}$
- $8T_{OSC}$
- $32T_{OSC}$
- Internal RC oscillator

La Tabla 4.6, muestra la frecuencia máxima de operación del reloj seleccionado para el convertidor A/D.

Tabla 4.6. Máximas frecuencias de operación

Operación	ADCS1:ADCS0	Max. Frecuencia
$2T_{OSC}$	00	1.25 MHz
$8T_{OSC}$	01	5 MHz
$32T_{OSC}$	10	20 MHz
RC	11	

Registro de resultado A/D: El par de registro ADRESH:ADRESL es la locación donde es cargado el resultado de 19 bits de la conversión A/D. El par de registros presenta un ancho de 16 bits. El módulo A/D ofrece la flexibilidad de justificar el resultado de 10 bits a la derecha o a la izquierda: El bit de selección del formato del resultado es el bit de control ADFM

La Figura 4.15, muestra la operación de justificación. Los bits extras son leídos como ceros.

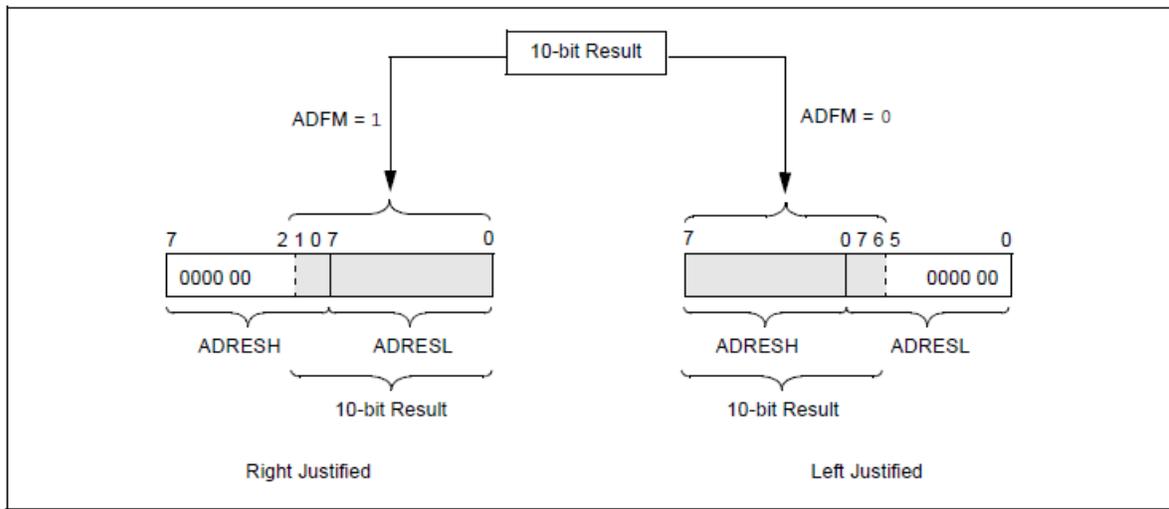


Figura 4.15. Operación de Justificación

Además, cuando en este par de registro no se escribe (conversión A/D deshabilitada), estos registros pueden ser usados como dos registros de 8 bits de propósito general.

4.3.6. Especificaciones del PIC16F873

4.3.6.1. Características mecánicas

La Figura 4.16 nos muestra las variables de las dimensiones del PIC16F873. Y en la Tabla 4.7, que se muestra luego, podemos ver las medidas expresadas en “pulgadas” y “milímetros”, además de la tolerancia de manufactura de todas las dimensiones.

Tabla 4.7. Medidas expresadas en pulgadas y milímetros del PIC16F873

Variables	Pulgadas			Milímetros		
	MIN	NOM	MAX	MIN	NOM	MAX
n		28			28	
p		.100			2.54	
A	.140	.150	.160	3.56	3.81	4.06
A2	.125	.130	.135	3.18	3.30	3.43
A1	.015			0.38		
E	.300	.310	.325	7.62	7.87	8.26
E1	.275	.285	.295	6.99	7.24	7.49
D	1.345	1.365	1.385	34.16	34.67	35.18
L	.125	.130	.135	3.18	3.30	3.43
c	.008	.012	.015	0.20	0.29	0.38

B1	.040	.053	.065	1.02	1.33	1.65
B	.016	.019	.022	0.41	0.48	0.56
eB	.320	.350	.430	8.13	8.99	10.92
α	5	10	15	5	10	15
β	5	10	15	5	10	15

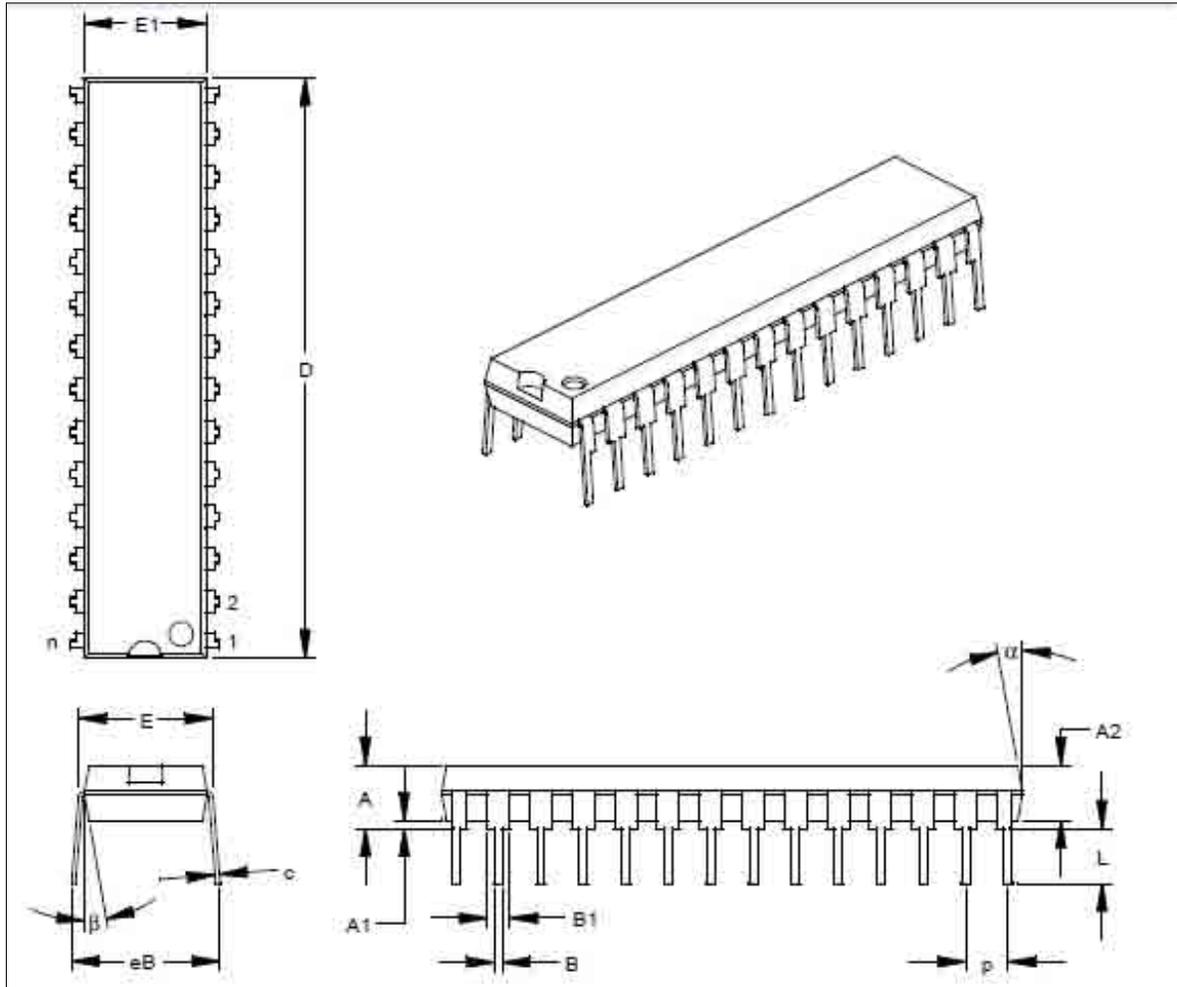


Figura 4.16. Dimensiones del PIC16F873

4.3.6.2. Características Eléctricas

En la Tabla 4.8, se muestra las características eléctricas para el PIC16F873 operando a 5V sobre una temperatura recomendada de 25°C. Si se presentara condiciones de operación que excedan a las que se detallan en la siguiente tabla, podrían generarse daños en el PIC.

Tabla 4.8. Características Eléctricas

Características Eléctricas	
Temperatura ambiente bajo sesgo	-55 a +125°C
Temperatura de almacenamiento	-65 a +150°C
Voltaje en cualquier pin con respecto a V_{SS} (excepto V_{DD} , MCLR. Y RA4)	-0.3V a (V_{DD} +0.3V)
Voltaje en V_{DD} con respecto a V_{SS}	-0.3 a +7.5V
Voltaje en MCLR con respecto a V_{SS}	0 a +14V
Voltaje en RA4 con respecto a V_{SS}	0 a 8.5V
Total de energía disipada	1.0W
Corriente de salida máxima del pin V_{SS}	300 mA
Corriente de entrada máxima del pin V_{DD}	250 mA
Corriente de entrada de pinza, I_{IK} ($V_I < 0$ o $V_I > V_{DD}$)	+/- 20 mA
Corriente de salida de pinza, I_{OK} ($V_O < 0$ o $V_O > V_{DD}$)	+/- 20 mA
Máxima corriente de alimentación de salida por cualquier pin I/O	25 mA
Máxima corriente para los PUERTOS A y B	200 mA
Máxima corriente para los PUERTOS C	200 mA

4.4. Modulo XBee

El módulo XBee con el trabajamos es el modelo XB24-AWI-001 de la firma Digi, este es un módulo de serie 1, fueron construidos para trabajar con necesidades de bajo costo, baja potencia de consumo en redes inalámbricas. Estos módulos requieren una mínima potencia y proveen de una entrega segura de datos entre dispositivos remotos.

A continuación se verán diversas características del módulo XBee.

4.4.1. Características

Estos dispositivos cuentan con una antena (antena whip)²⁷, la cual les permite un alcance en ambientes interiores aproximadamente de 30m y en espacios abiertos de 100m. Además poseen una potencia de salida de transmisión de 1 mW (0 dBm), además de otras características que serán descritas a continuación:

- **Relación precio con rendimiento:** Debido a las innovaciones incluidas en el diseño de los módulos XBee se obtuvieron beneficios en la calidad final del producto del rango de 2 a 3 veces sobre los módulos de competencia. Esto ha permitido que se cubran mayores extensiones de campo usando pocos dispositivos. Además los módulos XBee son fáciles de usar, de allí que, el costo del desarrollo de un sistema de datos se reduzca enormemente.

²⁷ Hace referencia a la antena tipo látigo.

- **Baja potencia de consumo:** Los módulos XBee utilizan poca potencia (45mA de corriente de Transmisión). Además el modo “sleep”, está disponible permitiendo corrientes que alcanzan valores inferiores a 10uA. Corriente de transmisión 45mA, de recepción 50mA a 3.3V.
- **Rango de integridad en la transmisión de datos:** Como se menciona este módulo cuenta con una antena (whip) que le permite un alcance en ambientes interiores de 30m y en ambientes exteriores hasta 100m. Su potencia de transmisión es de 1mW (0 dBm), corriente de recepción < 10uA; frecuencia de operación 2.4 GHz y velocidad de datos en RF 250, 000 bps.
- **Seguridad y redes:** Se usa el Espectro de Dispersión de secuencia Directa (DSSS-Direct Sequence Spread Spectrum). Cada canal de secuencia directa tiene sobre 65000 únicas direcciones de red habilitadas. Se puede direccionar el origen y destino, además de poseer comunicación unicast y broadcast (comunicación de 1 polo hacia todos). Soporta topologías Punto-punto, multipunto e igual a igual (peer to peer).
- **Soporte de líneas de entrada/salida y líneas análogo-digitales:** Posee módulo de conversión análogo-digital, entrada/salidas digitales y líneas de transferencia de entrada/salida.

4.4.2. Entradas y salidas digitales

En la Figura 4.17, podemos apreciar la configuración de los pines del módulo XBee de 20 pines con paso nominal de 2 milímetros.

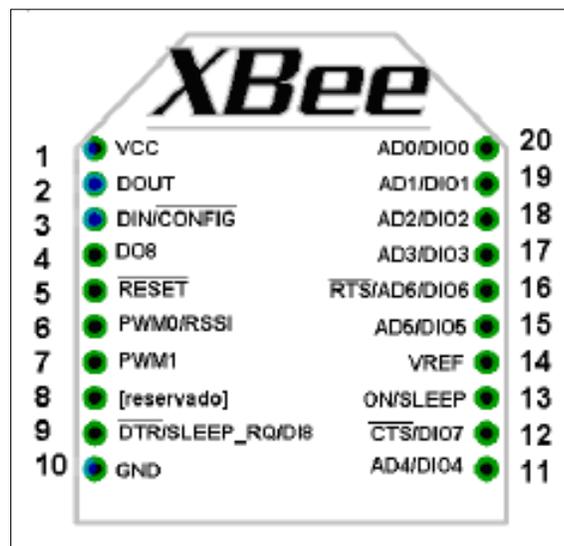


Figura 4.17. Vista en planta de la configuración de pines del módulo XBee

La Tabla 4.9 que se muestra a continuación, nos muestra la configuración predeterminada que tiene el módulo XBee.

Tabla 4.9 Configuración de pines del módulo XBee

Pin #	Nombre	Dirección	Descripción
1	VCC	-	Fuente de alimentación
2	DOUT	Salida	Salida de datos UART
3	DIN/CONFIG	Entrada	Entrada de datos UART
4	DO8	Salida	Salida digital 8
5	RESET	Entrada	Reseteo del modulo
6	PWM0/RSSI	Salida	Salida PWM 0/Indicador de señal larga Rx
7	PWM1	Salida	Salida PWM 1
8	[reservado]	-	No conectar
9	DTR/SLEEP_RQ/DI8	Entrada	Linea de control del pin Sleep o entrada digital 8
10	GND	-	Tierra
11	AD4/DIO4	Ambos	Entrada Análoga 4 o E/S digital 4
12	CTS/DIO7	Ambos	Control de flujo Clear-to-send o E/S digital7
13	ON/SLEEP	Salida	Iniciador de estado del módulo
14	VREF	Entrada	Voltaje de referencia para las entradas A/D
15	Associate/AD5/DIO5	Ambos	Indicador asociado. Entrada análoga 5 o E/S digital
16	RTS/AD6/DIO6	Ambos	Control de flujo Request-to-send, entrada análoga 6 o E/S digital 6
17	AD3/DIO3	Ambos	Entrada análoga 3 o Entrada/Salida digital 3
18	AD2/DIO2	Ambos	Entrada análoga 2 o Entrada/Salida digital 2
19	AD1/DIO1	Ambos	Entrada análoga 1 o Entrada/Salida digital 1
20	AD0/DIO0	Ambos	Entada análoga 0 o Entrada/Salida digital 0

4.4.3. Especificaciones del módulo XBee

4.4.3.1. Características mecánicas

Las figuras que se presentan a continuación nos muestran las dimensiones del módulo XBee.

Las medidas están expresadas en “pulgadas”, seguidas de su correspondiente valor en “milímetros” encerrado entre corchetes.

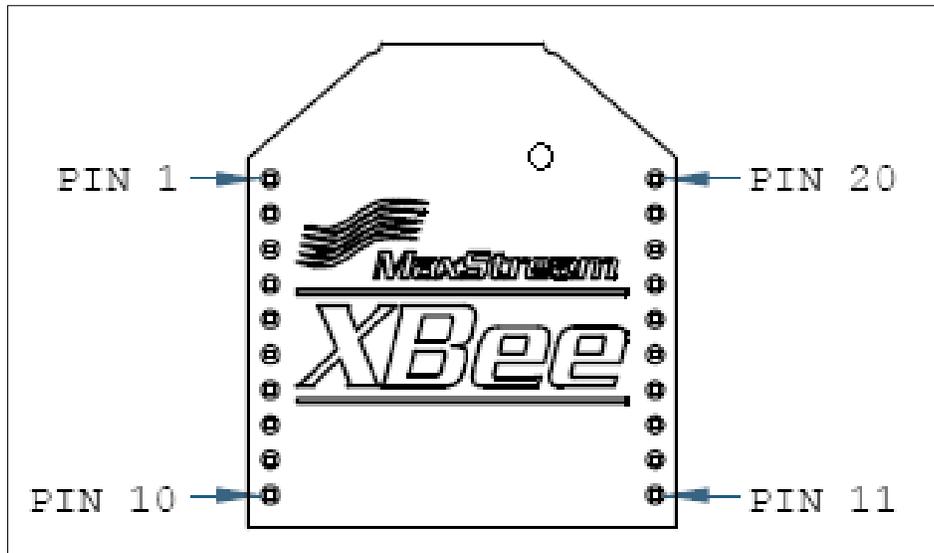


Figura 4.18 Vista en planta del módulo XBee

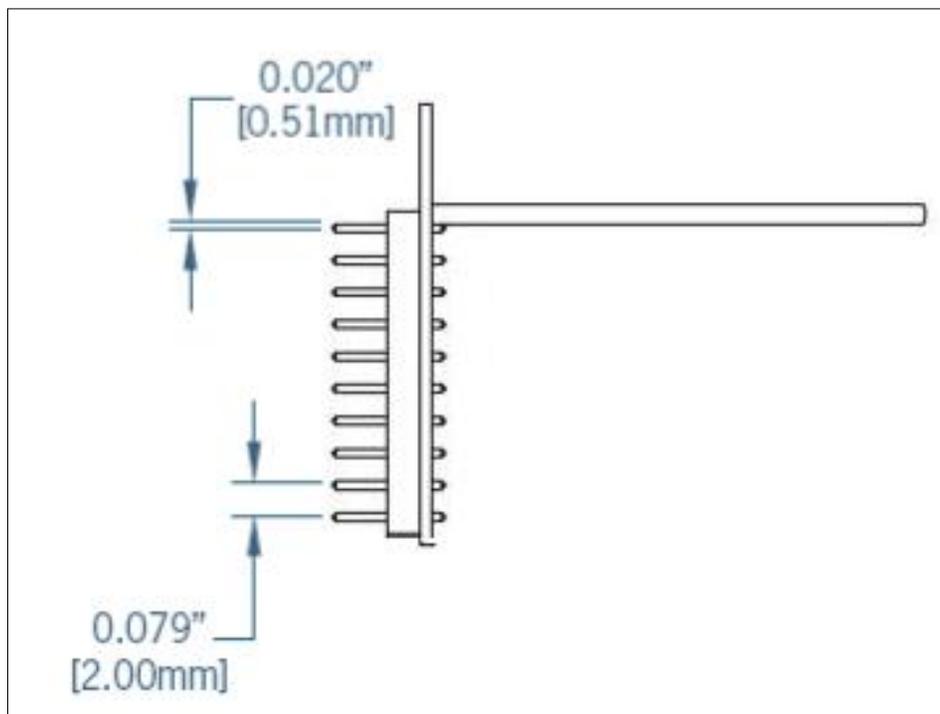


Figura 4.19 Vista lateral del módulo XBee

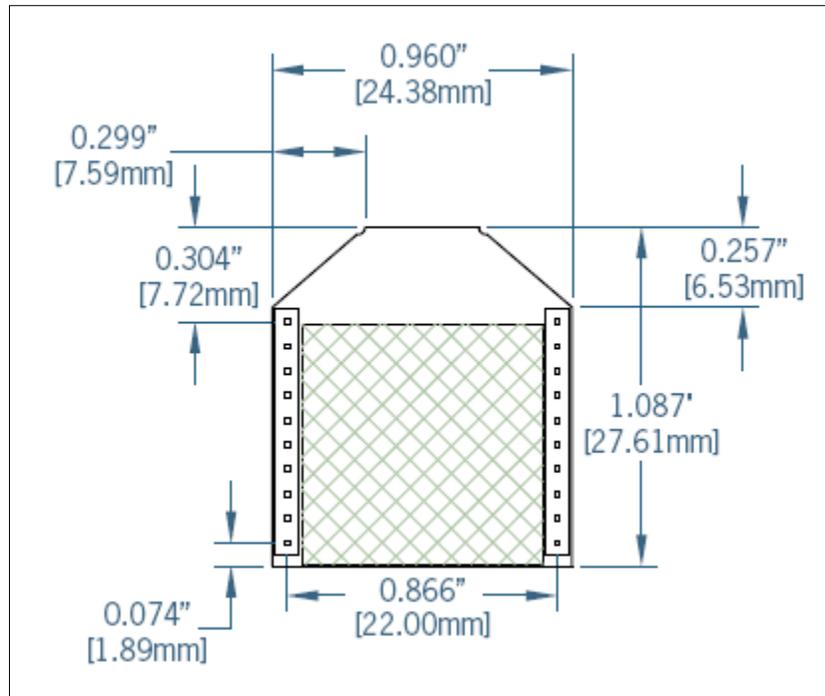


Figura 4.20 Vista inferior del módulo XBee

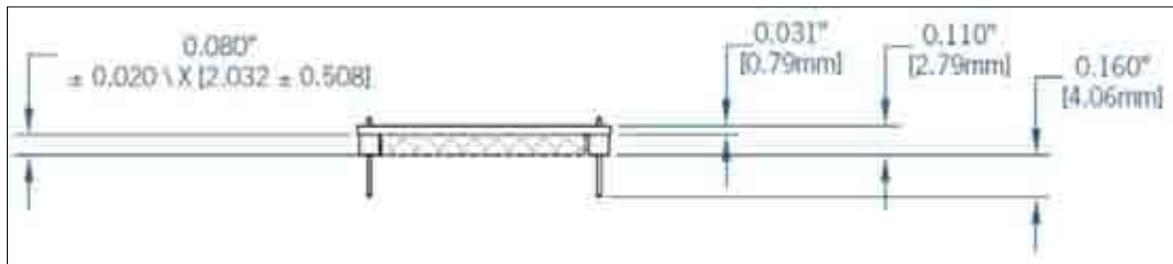


Figura 4.21 Vista lateral frontal del módulo XBee

4.4.3.1.1. Consideración de montaje

El módulo XBee fue diseñado para montarlo en su socket y así no requerir ninguna soldadura para montarlo sobre alguna placa. En esta tesis se aprovecha que el módulo tiene interface RS-232 para comunicar los datos adquiridos.

Debido a que no pudimos conseguir los sockets para el XBee, hemos usado los pines de unos socket normales, pero removiendo el plástico que separa a cada pin del otro, y funciona de igual manera como los sockets. Si se realiza esto, tener cuidado de que los pines no choquen entre ellos, ya que podría provocar un falso contacto. Esto se puede ver en las figuras del capítulo 3.

4.4.3.2. Características eléctricas

En las tablas que se muestran a continuación se pueden apreciar las características eléctricas para el módulo XBee, el cual opera a 3.3V. Si se presentara condiciones de operación que excedan a las que se detallan en las siguientes tablas, podrían generarse daños en módulo XBee.

Tabla 4.10. Características DC (VCC = 2.8 – 3.4 VDC)

Symbol	Characteristic	Condition	Min	Typical	Max	Unit
V _{IL}	Input Low Voltage	All Digital Inputs	-	-	0.35*VCC	V
V _{IH}	Input High Voltage	All Digital Inputs	0.7*VCC	-	-	V
V _{OL}	Output Low Voltage	I _{OL} = 2mA, VCC >= 2.7V	-	-	0.5	V
V _{OH}	Output High Voltage	I _{OH} =-2mA, VCC >= 2.7V	VCC-0.5	-	-	V
I _{IN}	Input Leakage Voltage	V _{IN} = VCC or GND, all inputs, per pin	-	0.025	1	uA
I _{OZ}	High Impedance Leakage Current	V _{IN} = VCC or GND, all I/O High-Z, per pin	-	0.025	1	uA
TX	Transmit Current	VCC = 3.3V	-	45	-	mA
RX	Receive Current	VCC = 3.3V	-	50	-	mA
PWR-DWN	Power-down current	SM parameter = 1	-	< 10	-	uA

4.4.3.3. Características técnicas

En la tabla que se muestran a continuación se pueden apreciar los detalles técnicos más importantes del módulo XBee.

Tabla 4.11. Detalles técnicos del módulo XBee

Funciones	
Tasa de datos	254 Kbps
Rango en interiores	30 m
Rango en exteriores	100 m
Potencia de transmisión	1mW (+0 dBm)
Sensibilidad del receptor (1% PER ²⁸)	-92 dBm
Características	
Interfaz de datos serial	3.3V CMOS UART
Métodos de configuración	Comandos AT o API
Banda de frecuencia	2.4 GHz
Inmunidad a la interferencia	DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)
Tasa de comunicación serial	1200bps a 250 Kbps
Conversores ADC	Conversores de 10 bit (hasta 7 disponibles) ²⁹
I/O Digitales	Hasta 8 disponibles
PWM (Pulse Width Modulation)	Hasta 2 disponibles
Opciones de antena	Chip, Wire chip, UFL y RPSMA
Dimensiones	0.960"x1.087" (2.438x2.761cm)
Temperatura de operación	-40 a 85°C (industrial)
Redes y Seguridad	
Encriptación	128 bits
Entrega confiable de paquetes	Retires/Acknowledgments (reintentos/aviso de recibo de paquetes)
ID's y canales	PAN ID (personal Area Network), 64-bit IEEE MAC, 16 canales.
Requerimientos de potencia	
Voltaje de alimentación	2.8 a 3.4 Vdc
Corriente de transmission	45mA @ 3.3 Vdc
Corriente de recepción	50 mA @ 3.3 Vdc
Corriente de apagado	< 10uA @ 25°C

²⁸ Packet Error Radio (tasa de paquetes erróneos).

²⁹ Pines compartidos entre las entradas/salidas digitales y analógicas.

Capítulo III

Solución de la transmisión de temperatura en procesos hidrotérmicos

Lo que se pretende lograr con el presente estudio, es poder transmitir los datos de temperatura de forma inalámbrica en un proceso hidrotérmico, el cual se emplea en el sector agroindustrial. Con la implementación de la RTU inalámbrica, se podrán tener los datos de manera segura, rápida y sin necesidad de cableado; siempre y cuando se encuentre dentro del rango de comunicación establecido.

En el presente capítulo, inicialmente, se realiza una descripción sobre el estado actual del proceso hidrotérmico empleado en las empresas agroindustriales, así como algunos de los problemas más comunes que se presentan en las conexiones cableadas. Esta descripción nos permitirá mostrar el problema que se intenta solucionar. Finalmente se describirá la solución propuesta para lograr una mejora en las instalaciones, comunicando la información de manera rápida, segura y sin cableado.

3.1. Situación actual del proceso hidrotérmico en la agroindustria

En primer lugar, analizaremos la situación actual del proceso hidrotérmico. Para esto, presentamos la figura 3.1 en la cual podemos apreciar esquemáticamente como es la instalación y distribución de los distintos elementos que conforman el sistema en análisis.

En la Figura 3.1, se muestra la situación actual de transmisión de temperatura en un proceso hidrotérmico.

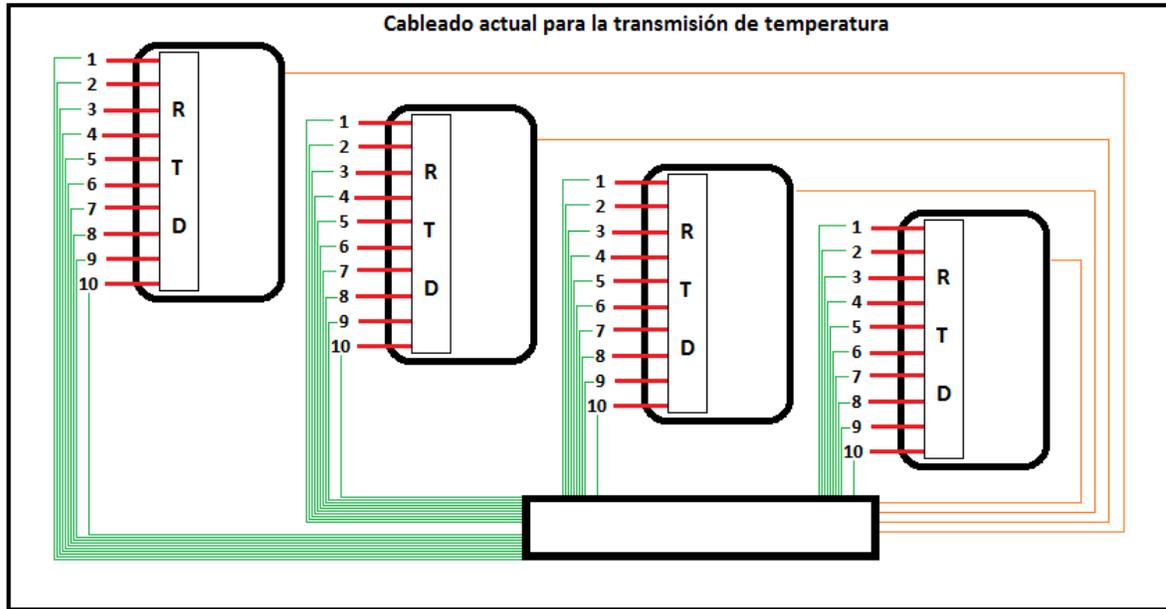


Figura 3.1. Situación actual del proceso hidrotérmico

En la figura anterior se presentan 4 tanques donde las frutas que sufren este proceso son sumergidas. Se tienen 10 sensores de temperatura resistivos (RTD) por cada tanque.

Las señales analógicas que contienen la información de la temperatura obtenida por los RTDs en cada tanque, son enviadas en forma independiente (cables presentados por líneas color verde) hacia un procesador. Luego de recibir y procesar las señales analógicas de los sensores, el mismo procesador, por medio de pulsos eléctricos (enviados a través de cables representados por líneas naranjas), manda aumentar o disminuir la temperatura dentro de los tanques para poder mantenerla dentro del rango establecida, el cual debe ser 46.1°C durante todo el proceso (esto puede variar, dependiendo del peso de la fruta y el tiempo que se aplique el tratamiento). Los cables por los cuales se transmite la información de temperatura son independientes, ponemos de manera esquemática 10 sensores de temperatura por tanque, pudiendo ser más o menos, dependiendo de la aplicación, se puede deducir que la cantidad de conductores empleados es considerable.

La explicación anterior nos da a conocer como se realiza la transmisión de temperatura en un proceso hidrotérmico en la actualidad.

3.1.1. Principales problemas en las conexiones cableadas

A continuación hablaremos de las complicaciones que se tienen, las cuales se quieren solucionar en este proceso:

- Las instalaciones tienen conexiones independientes para cada sensor de temperatura con el procesador. Por lo tanto, se necesita gran cantidad de cables para realizar el conexionado de todos los elementos del proceso de toma y transmisión de temperatura, lo que se traduce en un elevado costo de instalación (ya que el cablea utilizado para los RTDs es de costo elevado) y dificultades para trabajar con estas.
- La existencia de grandes cantidades de cables, que viajan juntos desde los sensores en los tanques hasta el procesador, transmitiendo a un punto lejano una señal de corriente o tensión, la cual podría presentar algún tipo de caída a lo largo del recorrido, o contaminarse con la interferencia electromagnética producida por los sistemas eléctricos presentes como motores, relays, actuadores, conmutadores, etc.; de esta manera pueden ingresar a nuestro sistema señales indeseadas que restarán precisión al sistema.

Ahora nos extenderemos un poco más, describiendo algunas de las complicaciones más comunes:

En los sistemas de conexiones cableadas, se utilizan muchas técnicas para poder evitar la interferencia electromagnética que puede generar una lectura errónea de lo que se quiere medir. Siendo estas técnicas complicadas y costosas.

- **Técnicas de blindaje**

Se proponen técnicas de blindaje contra el ruido, las cuales abordan blindaje contra el ruido capacitivo (eléctrico), como el inductivo (magnético).

En las redes de conmutación, este blindaje toma forma de cables apantallados y conectores especiales. Para frecuencias superiores a 100 MHz, se usa doble blindado como por ejemplo en el cable coaxial.

En la Figura 3.2, se muestra de manera gráfica la recomendación de blindaje para cables de baja frecuencia.

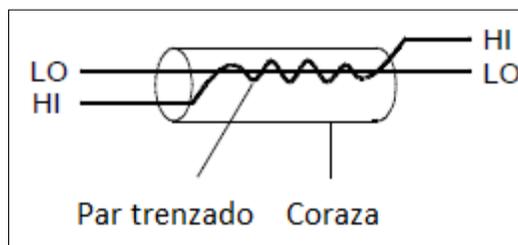


Figura 3.2. Par trenzado apantallado

En la Figura 3.3, se muestra de manera gráfica la recomendación de blindaje para cables de alta frecuencia.

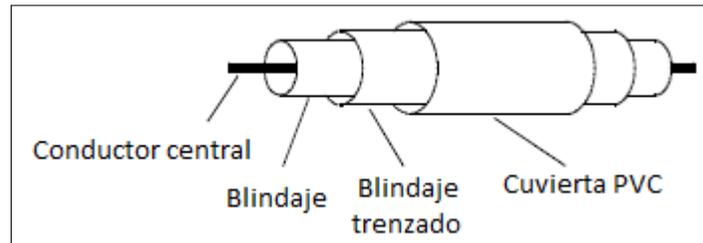


Figura 3.3. Doble blindado cable coaxial

- **Separación de señales de alto y bajo nivel**

Las señales cuyos niveles exceden una proporción 20 a 1 deberían estar físicamente separadas tanto como sea posible.

- **Errores de fuentes de sistemas cableados:**

- **Interferencia por radiofrecuencia**

La mayoría de los instrumentos de medida pueden generar falsas lecturas en presencia de señales de alta frecuencia. Las posibles fuentes de señales de alta frecuencia incluyen radio cercano y transmisores de televisión, monitores de computadoras, y teléfonos celulares.

En la Figura 3.4, se muestra como se realiza la conexión para este caso:

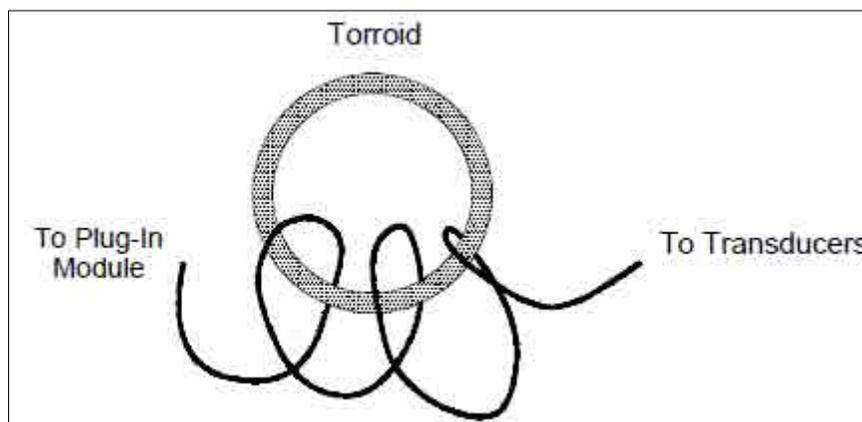


Figura 3.4. Conexión para interferencia por radiofrecuencia

- **Errores térmicos EMF;**

Los voltajes termoeléctricos son las fuentes más comunes de error en mediciones de voltaje DC de bajo nivel. Los voltajes termoeléctricos se generan al realizar las conexiones de circuitos que utilizan diferentes metales a distintas temperaturas. Cada unión de metal a metal forma un termopar, que genera una tensión proporcional a la diferencia de temperatura de la unión.

En la Tabla 3.1, se muestra los voltajes termoeléctricos comunes entre dos metales distintos.

Tabla 3.1. Tabla de voltajes termoeléctricos

Copper-to-	Approx. $\mu\text{V} / ^\circ\text{C}$
Copper	<0.3
Gold	0.5
Silver	0.5
Brass	3
Beryllium Copper	5
Aluminium	5
Kovar or Alloy 42	40
Sillicon	500
Copper-Oxide	1000
Cadmium-Tin Solder	0.2
Tin-Lead Solder	5

- **El ruido causado por los campos magnéticos:**

Si las mediciones se realizan cerca de campos magnéticos, se generan tensiones inducidas en las conexiones de medición. Tensión que puede ser inducida por cualquier movimiento de las conexiones al entrar en un campo magnético fijo o uno variable. Un cable sin blindaje, o mal protegido al entrar en un campo magnético puede generar varios milivoltios, los cuales perjudican en la lectura de los datos medidos.

- **Errores de medida en niveles bajos de AC**

Cuando medimos voltajes de AC menores que 100 mV, se debe tener en cuenta que estas medidas son especialmente susceptibles a los errores introducidos por las fuentes de ruido extraños. Un cable expuesto, actuará como una antena.

El trayecto completo de medición, incluyendo la línea de potencia, actúa como un bucle de antena. Las corrientes circulantes en el bucle crean tensiones de error a través de cualquier impedancia en serie con la entrada del instrumento.

Se puede determinar el error, como se muestra a continuación:

$$\text{Voltaje Medido} = \sqrt{V_{in}^2 + \text{Noise}^2}$$

Aunque poco frecuente, el ruido correlacionado es especialmente perjudicial, ya que siempre se sumará directamente a la señal de entrada. Medir una señal de bajo nivel con la misma frecuencia que la línea de alimentación local es una situación común, propensa a este error.

Como vemos, el sistema actual presenta desventajas que restan confiabilidad en la toma de temperaturas, así también, se genera un problema cuando se quiere hacer algún tipo de manipulación o arreglo por la cantidad de cableado, motivo por el cual, la tesis desarrollada, busca brindar una solución específica para los problemas antes mencionados.

Para esto, se presenta un análisis de la solución propuesta para la transmisión de datos en el proceso hidrotérmico que realizan las empresas en la agroindustria.

3.2. Solución propuesta para la transmisión de temperatura

A continuación, se presentan las distintas soluciones planteadas para mejorar el proceso de medida y transmisión de temperaturas en el tratamiento hidrotérmico. Para esta tesis se ha llevado a cabo solamente el primer caso planteado.

También presentamos los distintos elementos que en conjunto utilizaremos para poder optimizar la transmisión en el proceso hidrotérmico. Se pretende mencionar las ventajas que el sistema, propuesto en la solución, nos brindará en relación a la problemática presente en los sistemas actualmente utilizados.

3.2.1. Optimización de la transmisión de datos en el proceso hidrotérmico

Plantaremos dos casos, en los dos se plantea la solución a los problemas ya mencionados para la transmisión de temperaturas medidos por los RTDs.

Como hemos podido apreciar en la Figura 3.1, el sistema hidrotérmico actual realiza conexiones independientes de transmisión de datos (líneas de color verde) por cada sensor desde los tanques hasta el procesador, estas señales analógicas son procesadas para medir y tener una temperatura uniforme en el tanque; realizando así el proceso de control de temperatura en el sistema.

a) Primer caso:

En el primer caso usaremos una tarjeta de transmisión de datos por cada tanque, en la cual hay un módulo XBee que trabaja como dispositivo final, habrá también un microcontrolador que recibirá las temperaturas medidas por los 10 sensores y mediante el XBee dispositivo final los transmitirá de forma inalámbrica hacia una tarjeta de recepción de datos, la cual esta comunicada con el procesador; esta tarjeta de recepción tiene un módulo XBee que trabaja como coordinador y recibe la información de los dispositivos finales de la red.

A continuación se presenta, la Figura 3.5, en la que se puede apreciar esquemáticamente, la nueva configuración para la transmisión en el proceso hidrotérmico, luego de implementar la solución propuesta para conseguir la optimización del proceso.

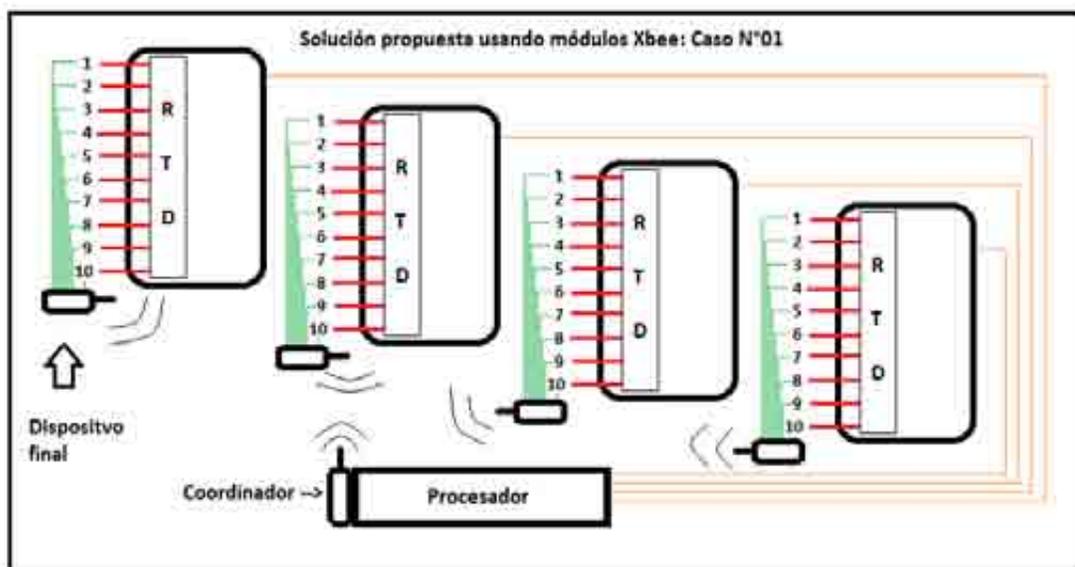


Figura 3.5. Solución propuesta para el proceso hidrotérmico: Caso N°01

A diferencia del sistema actualmente usado, podemos apreciar cómo se realiza la transmisión de datos en forma inalámbrica a través de la implementación de los módulos XBee. Estos módulos XBee de transmisión inalámbrica, son los encargados de realizar la comunicación entre los sensores en cada tanque y el procesador, el cual realiza el control en el proceso hidrotérmico.

b) Segundo caso:

En el segundo caso usamos una tarjeta de transmisión de datos por cada sensor RTD, en la cual hay un módulo XBee que trabaja como dispositivo final. De los 20 terminales del módulo XBee utilizado, siete corresponden a entradas analógicas y ocho incluyendo las anteriores corresponden a entradas o salidas digitales (configurables por comandos de

módem); el módulo XBee posee internamente un conversor Analógico/Digital de diez bits. Esto nos permite evitar el uso de microcontroladores para este caso, ya que el XBee puede reemplazar su función. Solo debemos tener en cuenta que el XBee trabaja a 3.3V, de manera que si es necesario se debe adecuar las señales para que sean compatibles con el módulo.

Luego estos datos serán transmitidos de forma inalámbrica gracias al XBee dispositivo final hacia la tarjeta de recepción de datos, la cual está comunicada con el procesador; esta tarjeta de recepción tiene un módulo XBee que trabaja como coordinador y recibe la información de los dispositivos finales acoplados a la red.

A continuación se presenta, la Figura 3.6, en la que se puede apreciar esquemáticamente, la configuración para el caso N°02 de la transmisión en el proceso hidrotérmico, luego de implementar la solución propuesta para conseguir la optimización del proceso.

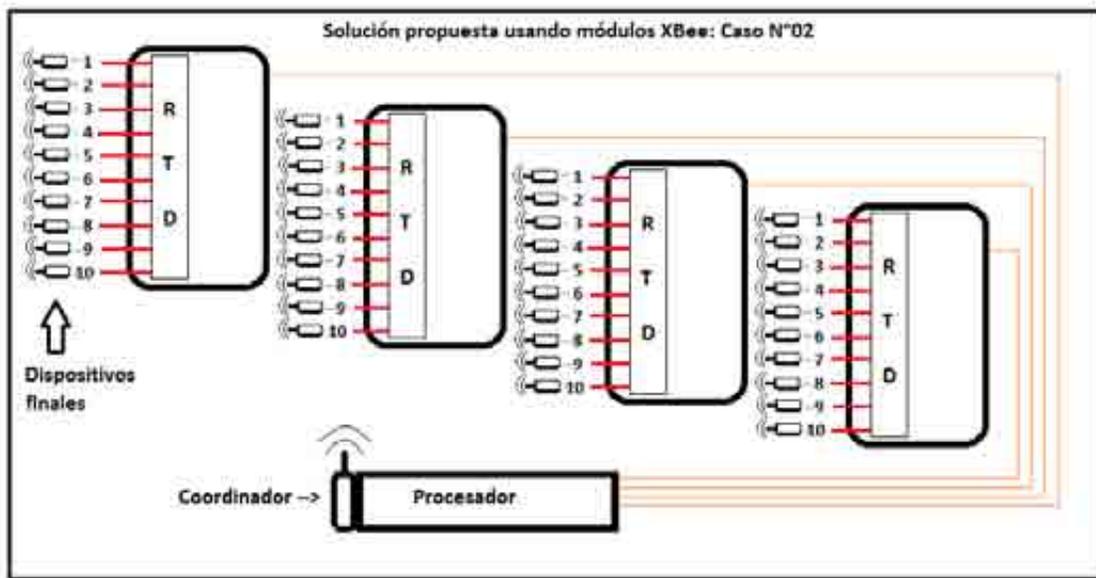


Figura 3.6. Solución propuesta para el proceso hidrotérmico: Caso N°02

A diferencia del sistema actualmente usado y del caso anterior, podemos tener un sistema más independiente, si sucediera algún tipo de necesidad en la manipulación o corrección en algún módulo no afectaría en la medida general del proceso. Además se aprecia cómo se realiza la transmisión de datos en forma inalámbrica, gracias a los módulos XBee implementados.

3.2.1.1. Tarjeta acondicionadora de señal de 4 a 20 mA

En la Figura 3.7, podemos apreciar el transmisor XTR105, el cual será estudiado con profundidad en el Capítulo IV, Apartado 4.1.1:

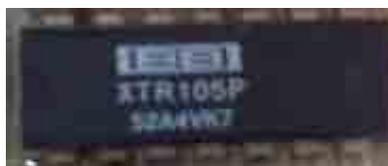


Figura 3.7. Transmisor XTR105

El XTR105 es un transmisor monolítico de corriente de 4 a 20 mA de dos hilos, diseñado para sensores de temperatura “RTD”. Provee a los RTD de una completa corriente de excitación, instrumentación de amplificación, linealización y circuitos de corriente de salida en un solo circuito integrado.

En la Figura 3.8, se esquematiza la configuración del sistema que se utiliza para el acondicionamiento de señal del sensor de temperatura “RTD”



Figura 3.8. Configuración del sistema de acondicionamiento

Este circuito se utiliza para señales analógicas y para controlar la salida de corriente en una relación lineal con una señal de entrada de pequeño nivel. Esta salida de corriente produce voltajes de 1 a 5V en un receptor resistivo de 250ohm.



Figura 3.9. Tarjeta acondicionadora de señal de 4 a 20 mA

No se trabajara con el sensor “RTD” ni con esta placa; se reemplazaran por un potenciómetro, el funcionamiento será el mismo. Pero el estudio se hará con esta tarjeta.

3.2.1.2. Tarjeta de Transmisión de datos

La tarjeta de transmisión de datos, que será estudiada a profundidad en el Capítulo IV, Apartado 4.1, se presenta en la Figura 3.10:



Figura 3.10. Tarjeta de transmisión de datos

La estructura de la Tarjeta de transmisión, está diseñada para trabajar con el potenciómetro o el RTD (si se trabaja con el “RTD” no se debe olvidar colocar la resistencia de 250 ohms ya que la tarjeta acondicionadora da una salida de 4 a 20 mA), el módulo XBee, el microcontrolador y el 74LS04 que comunica al PIC y el XBee.

En la Figura 3.11, podemos apreciar la distribución de las distintas etapas que conforman la tarjeta de transmisión.



Figura 3.11. Etapas de la tarjeta de transmisión de datos

Dichas etapas que conforman la Tarjeta de transmisión de datos, serán estudiados a profundidad en el Capítulo IV, Apartado 4.1.

Esta tarjeta, sirve como interfaz para la recepción de los datos acondicionados, gracias al transmisor XTR105, provenientes del sensor de temperatura (RTD), así los datos llegan al microcontrolador, el cual se dedica a procesar los datos medidos y mediante el modulo XBee se pueda transmitir la información inalámbricamente.

Al momento de que el sensor capte las temperaturas y mande los datos medidos el transmisor XTR105 toma estos datos y los acondiciona para que puedan ser procesados por el microcontrolador, el cual recibe los datos acondicionados, luego se hace la conversión Analógica/Digital y envía mediante la UART hacia el modulo XBee, el cual a su vez recibirá la información y la enviara inalámbricamente bajo el protocolo de comunicación ZigBee, el cual es usado por este tipo de módulos.

A continuación, se presenta la Figura 3.12, en la que podemos apreciar el PIC16F873, el cual será estudiado con profundidad en el Capítulo IV, Apartado 4.3:



Figura 3.12. PIC16F873

El PIC16F873, debe conectarse a la tarjeta de transmisión de datos, para poder cumplir con el procesamiento de los datos medidos por el sensor.

A continuación, se presenta la Figura 3.13, en la que podemos apreciar el modulo XBee, el cual será estudiado con profundidad en el Capítulo IV, Apartado 4.4:



Figura 3.13. Modulo XBee

El modulo XBee, debe conectarse a la tarjeta de transmisión de datos, para poder cumplir con la transmisión de datos inalámbricamente. Podemos apreciar lo antes mencionado en la Figura 3.14, la cual nos presenta al módulo XBee, conectado a la tarjeta de transmisión de datos:



Figura 3.14. Modulo XBee, montado sobre la Tarjeta de transmisión de datos

La tarjeta de transmisión de datos, fue diseñada para recibir y transmitir 4 temperaturas medida por los sensores, teniendo en cuenta que el PIC16F873 utilizado puede recibir hasta 5 señales analógicas. Si se desea tener una mayor entrada de datos, se tendría que escoger otro microcontrolador que tenga una mayor cantidad de entradas para recibir los datos de temperatura de distintos sensores. Entonces, la solución contempla una entrada para 4 señales de temperatura, las cuales son transmitidas inalámbricamente. Aunque se puede pensar que un sistema hidrotérmico cuente con mayor cantidad de sensores como se ve en la Figura 3.5; por lo que se necesitaría mayor cantidad de entradas en la tarjeta de transmisión y otro microcontrolador que lo soporte como ya mencionamos.

El PIC16F873 y el modulo XBee, necesitan la tarjeta de transmisión que se ha implementado, para poder cumplir con las aplicaciones ya programadas. Dichas aplicaciones se programan haciendo uso del programa MPLAB X²⁶ para el PIC16F873; para el Xbee se puede usar hyperterminal o el programa X-CTU de Digi, nosotros usaremos el programa X-CTU ya que nos facilita mucho la interacción con el módulo. Estos programas serán estudiados con mayor profundidad en el Capítulo V.

3.2.1.3. Tarjeta de Recepción de datos

La tarjeta de recepción de datos, que será estudiada a profundidad en el Capítulo IV, Apartado 4.2, se presenta en la Figura 3.15:



Figura 3.15. Tarjeta de recepción de datos

²⁶ Programa que nos permite programar PICs en lenguaje C y C++.

La Tarjeta de recepción, trabaja con el circuito integrado 74LS04 y el módulo XBee. Se debe tener en cuenta que el 74LS04 se está utilizando con alimentación a 3.3V.

En la Figura 3.16, podemos apreciar la distribución de las distintas etapas que conforman la tarjeta de recepción.

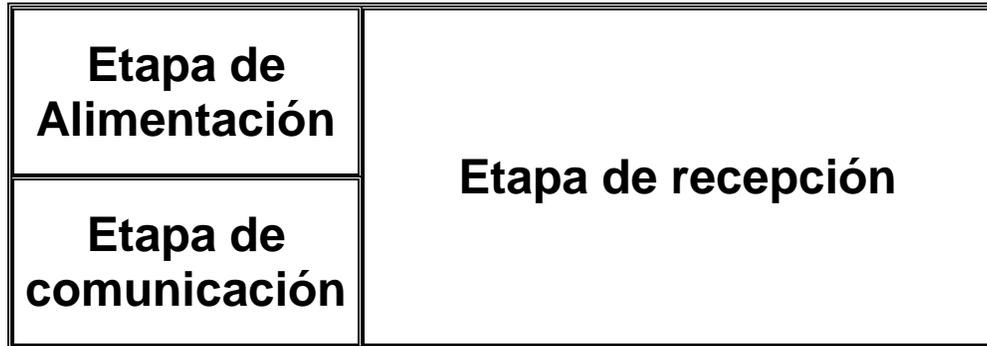


Figura 3.16. Etapas de la tarjeta de recepción de datos

Dichas etapas que conforman la Tarjeta de recepción de datos, serán estudiados a profundidad en el Capítulo IV, Apartado 4.2.

Esta tarjeta, sirve como interfaz entre los datos transmitidos inalámbricamente y el procesador, ayudando a la recepción de estos datos, gracias al modulo XBee, provenientes de la tarjeta de transmisión. Además ayuda a comunicar estos datos con el procesador por comunicación serial mediante el circuito integrado 74LS04.

Al momento de que el modulo XBee reciba los datos de temperatura transmitidos inalámbricamente, envía pulsos eléctricos a través de los pines de salida de la UART hacia el 74LS04, el cual a su vez envía la información hacia el procesador.

A continuación, se presenta la Figura 3.17, en la que podemos apreciar el circuito integrado 74LS04, el cual será estudiado con profundidad en el Capítulo IV, Apartado 4.2.1:



Figura 3.17. Circuito integrado 74LS04

El circuito integrado 74LS04, debe conectarse a la tarjeta de recepción de datos, para poder cumplir con la transmisión serial de la información. Se puede apreciar lo mencionado en la Figura 3.15, en la cual se presenta el circuito integrado 74LS04 conectado a la tarjeta.

Debemos tener en cuenta que para que haya una comunicación con la PC o algún ordenador lo mínimo que tenemos que conectar del XBee es el DIN, DOUT, RTS, DTR, GND y VCC. El módulo XBee, debe conectarse a la tarjeta de recepción de datos, para poder cumplir con la recepción de datos inalámbricamente. Podemos apreciar lo antes mencionado en la Figura 3.18, la cual nos presenta al módulo XBee conectado a la tarjeta de recepción de datos:



Figura 3.18. Modulo XBee, montado sobre la Tarjeta de recepción de datos

La tarjeta de recepción de datos, fue diseñada para recibir las temperaturas medidas anteriormente, las cuales son transmitidas inalámbricamente mediante el modulo XBee, el cual usa el protocolo ZigBee para la comunicación. Además de poder transmitir estos datos ya recibidos, por comunicación serial.

Las tarjetas implementadas ayudan a transmitir la información inalámbricamente, por medio del protocolo ZigBee, el cual es usado por los módulos XBee implementados, por lo que se evitara el cableado. Estos módulos XBee se encuentran en las placas de transmisión y recepción, ayudando a que las medidas de temperatura registradas viajen inalámbricamente. Los datos luego de ser recepcionados serán transmitidos por serial hacia el procesador.

De esta manera, por medio del uso de comunicación inalámbrica, se reduce de manera significativa el cableado para poder transmitir al procesador los datos de temperatura medidos anteriormente por los sensores de temperatura. Así mismo el uso de comunicación serial, ayuda a reducir de manera significativa el cableado entre la tarjeta de recepción y el procesador.

Con la implementación de esta propuesta, nuestro sistema se comunicará por medio de los módulos XBee para la comunicación inalámbrica, utilizando el protocolo ZigBee para la transmisión de datos. Por lo tanto, gracias a la implementación de las tarjetas de transmisión y recepción, tendremos la disponibilidad para transmitir los datos de temperatura medidos en el proceso hidrotérmico, enviando los datos de una manera más segura, precisa, y sin dificultades de instalación o modificación. Recordando que dependiendo del microcontrolador que usemos para poder recibir la cantidad de datos requeridos por el sistema.

3.2.1.4. Selección de módulo XBee para realizar la transmisión de temperatura

En este apartado describiremos algunas razones por las cuales se eligió el uso de la tecnología ZigBee y para realizar la optimización del proceso hidrotérmico en la agroindustria.

El mercado nos ofrece distintas opciones de solución para el proceso en cuestión, sólo haremos referencia a posibles soluciones con las cuales estamos más familiarizados; respecto a la transmisión: el uso de ZigBee, WIFI y de Bluetooth.

Ahora comparemos ZigBee con algunos de los estándares más populares que trabajan en la frecuencia libre o sin licencia de los 2.4 GHz.

Tabla 3.2. Tabla comparativa básica

ZigBee (WPAN)	Bluetooth (WLAN/WPAN)	WI-FI (WLAN)
-Estándar 802.15.4.	-Estándar 802.15.1.	-Estándar 802.11.
-250 kbps.	-1 Mbps.	-Mayor a 54 Mbps.
-TX: 35 mA.	-TX: 40 mA.	-TX: 400+mA.
-Modo de espera 3uA.	-Modo de espera 200 uA.	-Modo de espera 20mA.
-32 – 60 KB de memoria.	-100 + KB de memoria.	-100+ KB de memoria.
-Iluminación, sensores, periféricos.	-Audio, remplazo de cable.	-Empresarial, puntos de acceso casero.
-Red en malla, punto a punto, multipunto.	-Punto a multi-punto.	-Punto a multi-punto.

Los parámetros enlistados en la tabla 3.2, incluyen el estándar que rige cada MAC, máxima tasa de transferencia de datos, corriente típica de transmisión y de modo de espera, requerimientos de memoria para un dispositivo, Aplicaciones y opciones de red.

Bluetooth es un estándar popular aplicado al remplazo de cables, se basa en el estándar IEEE 802.15.1. PAN. La tasa de transferencia de Bluetooth es de 1 Mbps. Hay que tener en cuenta que el consumo de corriente de ZigBee y Bluetooth es similar durante la transmisión, pero ZigBee tiene un consumo significativamente bajo de corriente en el modo de espera. Esto es porque en una red de Bluetooth los dispositivos deben estar en constante comunicación para mantenerse sincronizados, y por eso no pueden entrar en “modo de espera”.

Wi-Fi Es un estándar LAN (Red de Área Local) inalámbrico, por lo que requiere de actividad casi continua en los dispositivos de red. La ventaja de este estándar es la enorme cantidad de datos que se pueden transmitir de un punto a múltiples puntos. Note las corrientes de transmisión y espera en la tabla 3.2. Los dispositivos de Wi-Fi han sido desarrollados para trabajar con un considerable consumo de potencia.

Hay que considerar que de los tres estándares inalámbricos, solo ZigBee ofrece flexibilidad para trabajar con redes en malla, también hay que notar la reducida memoria que requiere ZigBee; además que su electrónica para su implementación es muy sencilla. La aplicación típica de ZigBee es simple: el aprovechamiento de la potencia está en la red y en el hecho de que ZigBee y los dispositivos finales pueden “dormir o entrar en espera” al mismo tiempo que la red se mantiene asociada.

Uno de los puntos clave de la tabla 3.2, es mostrar que las normas inalámbricas se construyen en torno a lo que se denominan "modelos de uso" o "Aplicaciones". No hay una norma que reúna el requisito de utilizar todos los modelos de uso, por lo que elegimos la norma que más se ajusta a nuestros requerimientos de aplicación.

Gracias a la disponibilidad del modulo XBee en el Laboratorio de Electrónica de la Universidad de Piura, es que se decidió usarlo para implementar la solución para el proceso hidrotérmico en la agroindustria; además que este dispositivo se adecuan a trabajar con transmisión de datos de sensores.

Además, se ha desarrollado una guía práctica para el uso del programa que usa el modulo XBee mencionado, la guía se presenta en el Anexo II. Esta guía servirá como primer paso para que se puedan llevar a cabo nuevas aplicaciones que se deseen desarrollar con los módulos XBee por los alumnos de la Universidad, interesados en este tema.

Capítulo IV

Descripción del hardware

El diseño implementado tiene como razón principal el de crear una interfaz capaz de comunicar 2 dispositivos para poder transmitir información inalámbricamente, evitando el cableado, facilitando la instalación, manipulación y ahorro en la misma. Las tarjetas desarrolladas presentan características para funciones específicas.

A continuación estudiaremos cada una de las partes de las tarjetas implementadas:

4.1. Tarjeta de transmisión inalámbrica implementada

4.1.1. Etapa de Comunicación

En esta etapa se tomara en cuenta el circuito acondicionador de señal en el cual usamos el integrado XTR105; este circuito se encuentra en el Laboratorio de Electrónica de la Universidad de Piura.

La etapa de comunicación de la tarjeta respecto a la toma de temperatura se da en una sola dirección del sensor al microcontrolador.

Los distintos componentes que encontramos en esta etapa son los encargados de transmitir los datos desde el sensor al microcontrolador, acondicionando la señal recibida, mediante el integrado XTR105.

A continuación presentamos una breve descripción delo componente XTR105 usados en esta parte de la tarjeta y de su funcionamiento:

El sensor de temperatura utilizado se basa en la variación de la resistencia de un conductor con la temperatura. En un conductor, el número de electrones disponibles para la conducción no cambia apreciablemente con la temperatura. Pero si esta aumenta, las vibraciones de los átomos alrededor de sus posiciones de equilibrio son mayores y así dispersan más eficazmente los electrones, reduciendo su velocidad media. Esto implica un coeficiente de temperatura positivo, es decir, un aumento de la resistencia con la temperatura.

Las señales obtenidas por los sensores, se transmiten a un receptor, para esto se utiliza el XTR105, el cual es un transmisor de corriente 4-20mA con fuentes de precisión de corriente, el cual tiene como ventaja el emplear 4mA para el valor de cero, ya que permite distinguirlo de un circuito abierto (0mA). Este circuito integrado es de 14 terminales como se observa en la Figura 4.1, que funcionalmente se puede representar según se muestra en la Figura 4.2.

En la Figura 4.1, podemos ver la configuración de los pines del integrado antes descrito:

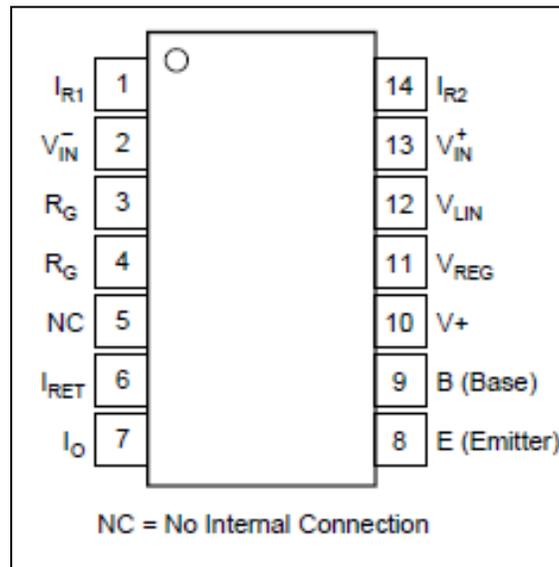


Figura 4.1. Vista de planta del integrado XTR105

- Si se usa un transistor externo (opcional), este queda conectado en paralelo con uno interno. De esta forma gran parte de la corriente de salida procede directamente de Vcc a través de Q1 (ver Figura 4.2), reduciendo el auto calentamiento del XTR105 y aumentando su precisión al disminuir las derivas térmicas.

En la Figura 4.3, se muestra el diagrama básico de conexión para el XTR105 con una RTD de dos hilos.

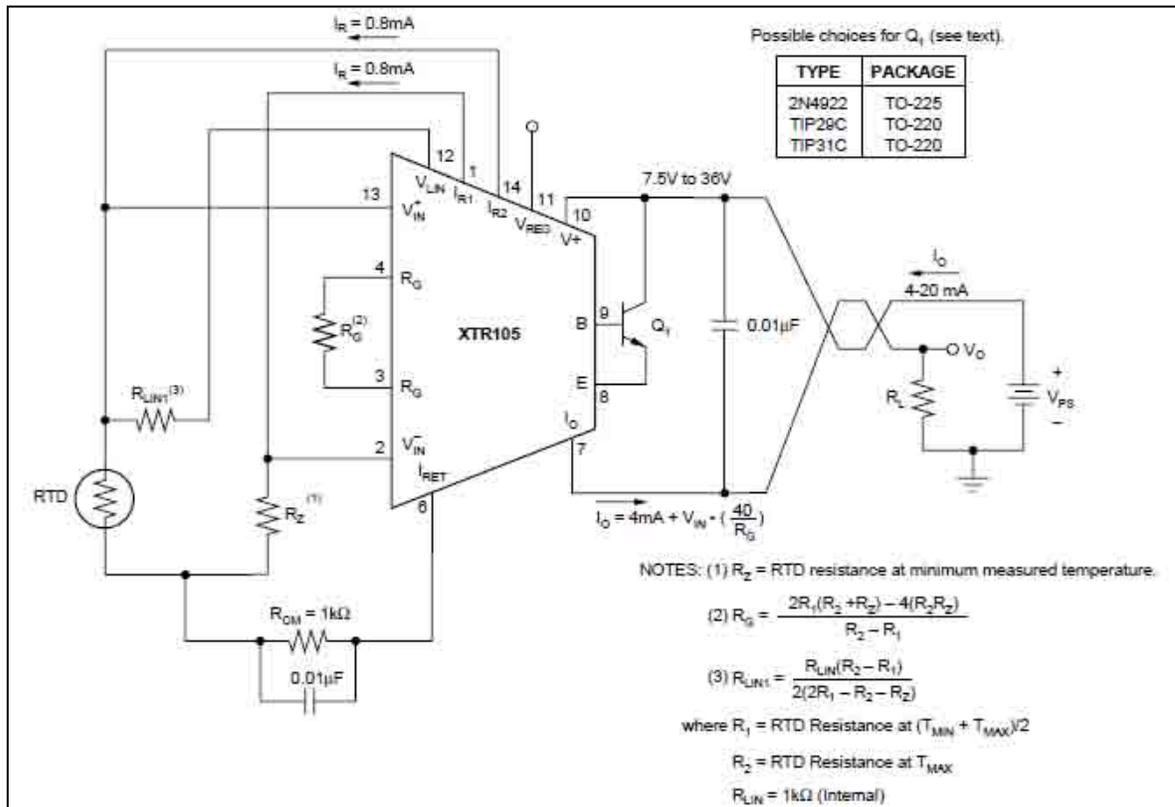


Figura 4.3. Diagrama básico para un RTD de dos hilos

La fuente de alimentación V_{ps} proporciona la alimentación a todo el circuito. La corriente de salida puede ser medida en serie con la resistencia de carga R_L .

Las dos fuentes de corriente manejan la RTD y en R_z se realiza el ajuste de cero, R_z debe ser del mismo valor de la RTD a la temperatura mínima que se pretenda medir para que a esta temperatura la corriente sea 4mA.

El amplificador de instrumentación mide la diferencia de voltaje entre la RTD y R_z . Los condensadores se utilizan para filtrar el ruido de alta frecuencia.

Los sensores para medir temperatura son fiables pero no lineales y con la adición de una o dos resistencias externas, R_{LIN1} y R_{LIN2} , es posible compensar la mayor parte de esta no linealidad causando 40:1 en la mejora de la linealidad sobre la salida.

En la Figura 4.3, el RTD puede ser ubicado remotamente, extendiendo las dos conexiones del RTD. Con esta conexión remota de 2 hilos, la resistencia de la línea nos dará un error. Este error puede ser corregido parcialmente por un ajuste en los valores de R_Z , R_G , y R_{LIN1} .

En la Figura 4.4, se muestra el diagrama básico de conexión para el XTR 105 con una RTD de tres hilos.

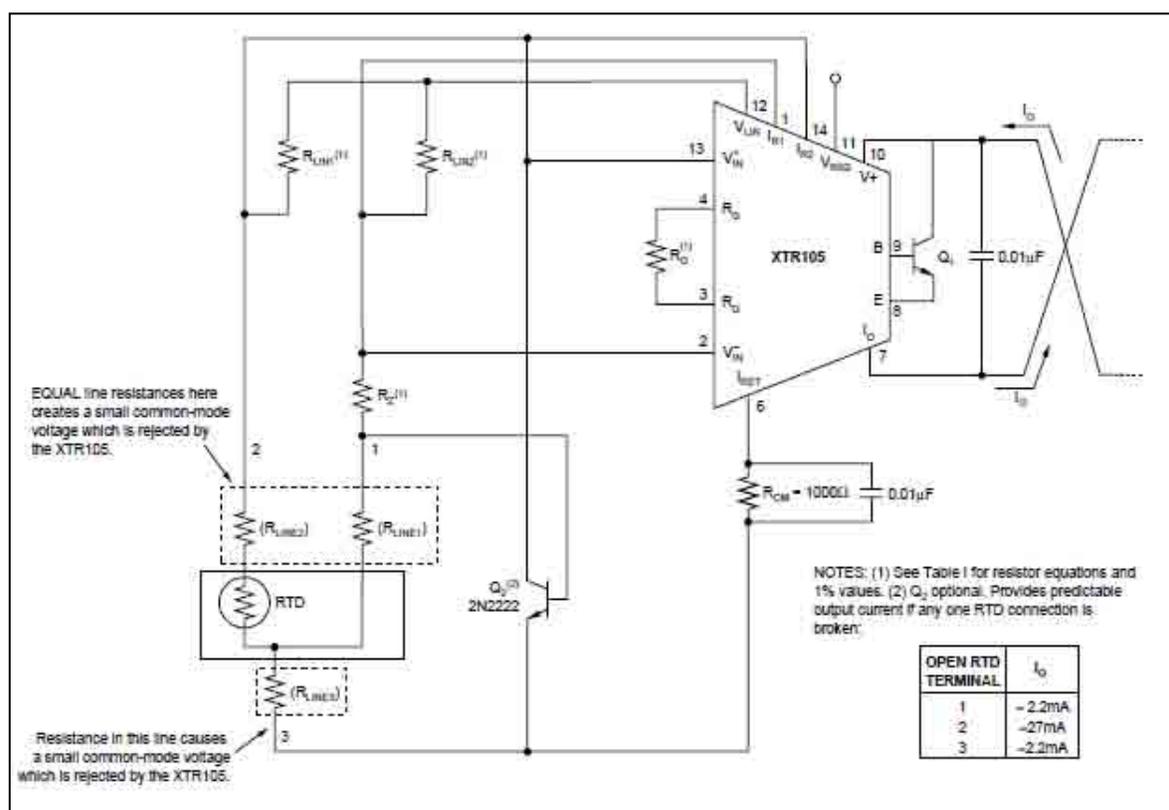


Figura 4.4. Diagrama básico para un RTD de tres hilos

Un mejor método para la ubicación remota del RTD es la conexión de 3 hilos para el RTD como se muestra en la Figura 4.4. Este circuito ofrece una mejora en la precisión. La corriente de R_Z pasa a través del tercer hilo del RTD. Asumiendo la resistencia de la línea es igual en las líneas 1 y 2 del RTD, esto produce un pequeño voltaje de modo-común, que es rechazado por el XTR105. La segunda resistencia, R_{LIN2} , se requiere para la linealización.

Nótese que aunque las conexiones para el circuito de 2 y 3 hilos para el RTD son muy parecidas, el ajuste-ganancia de la resistencia, R_G , tienen ecuaciones diferentes:

2 hilos:

$$R_G = \frac{2R_1(R_2 + R_Z) - 4(R_2 R_Z)}{R_2 - R_1}$$

3 hilos:

$$R_G = \frac{2(R_2 - R_Z)(R_1 - R_Z)}{R_2 - R_1}$$

Donde:

R_Z = Resistencia RTD en la T_{MIN}

R_1 = Resistencia RTD en la $(T_{MIN} + T_{MAX})/2$

R_2 = Resistencia RTD en la T_{MAX}

4.1.2. Etapa de Alimentación

A continuación en la Figura 4.5, se presenta el circuito que representa la etapa de Alimentación en nuestra tarjeta de transmisión implementada:

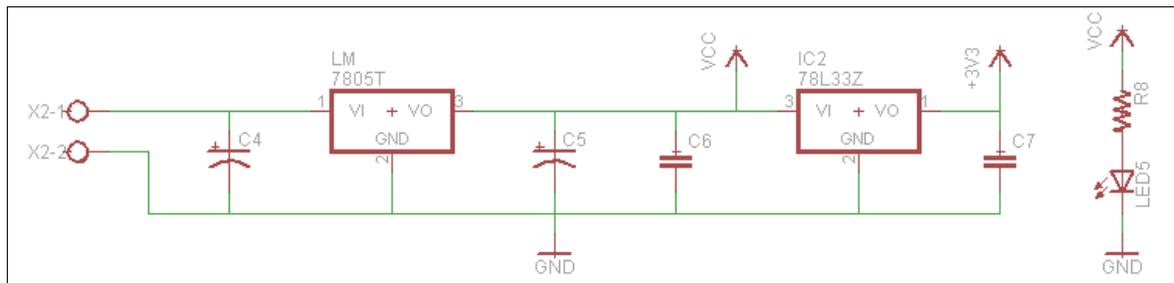


Figura 4.5. Circuito de la Etapa de Alimentación

Los componentes usados para esta parte de la tarjeta son descritos a continuación:

- **LM7805:**

Es un regulador de voltaje de tres terminales, capaz de entregar corriente de hasta 1 A en su terminal de salida; el voltaje mínimo que puede tener en su pin de entrada es de 6VDC y el máximo es de 35VDC, el voltaje en su terminal de salida oscila entre 4.8 y 5.2 VDC. Para la tarjeta desarrollada, el voltaje necesitado es de 5VDC.

- **78L33:**

Este es un regulador de voltaje de tres terminales; este es un regulador lineal de la familia 78XX. Funciona con cualquier fuente de 5 VDC o más. Regula a 3.3 VDC, que es lo que se necesita para poder alimentar a nuestro modulo de transmisión XBee.

- **Condensadores**

Sirven para eliminar ruidos y distorsiones de la señal externa de alimentación de nuestro circuito. Gracias a ellos tenemos siempre el voltaje con las características necesarias como para asegurar un óptimo funcionamiento del microprocesador.

- **Resistencias y Diodo LED (Light Emitting Diode)**

Como podemos apreciar en el diagrama, la resistencia y el respectivo diodo están puestos en paralelo a la carga que se va alimentar, por lo que su función es la de señalar los instantes de funcionamiento de la Etapa de Alimentación.

4.1.3. Etapa de Programación

La programación de las funciones se realizará en el microcontrolador PIC16F873, el cual será estudiado más adelante.

4.1.4. Etapa de Transmisión

La transmisión de los datos se realizara por el modulo XBee, el cual será estudiado más adelante.

4.1.5. Listado de componentes

A continuación se presenta la Tabla 4.1, en la que podemos apreciar los distintos componentes de la tarjeta de transmisión de datos implementada:

Tabla 4.1. Elementos usados en la tarjeta de transmisión de datos

Elementos	Cantidad
Bornera de 2 pines	3
Regulador 7805	1
Regulador 78L33	1
Resistencias de 330 Ω	2
Resistencias de 1 kΩ	2
Condensadores cerámicos 104	3
Condensadores cerámicos 33	2
Condensador de 100uF 25V	1
Condensador de 10uF 25V	1
Pulsadores	2
Cristal	1
Diodo LED	3
Socket 7-2	1
Socket 14-2	1
Pines para XBee	20
Pines	8

4.2. Tarjeta de recepción inalámbrica implementada

4.2.1. Etapa de Comunicación

La etapa de comunicación de la tarjeta presenta para este caso que estamos estudiando una comunicación bidireccional (Rx-Tx), mediante el puerto serial se puede enviar o recibir información.

Los componentes que encontramos en esta etapa se encargan de recibir los datos enviados por algún dispositivo, en este caso el modulo XBee que recibe los datos medidos de temperatura y los comunica gracias al 74LS04 por serial hacia el procesador, en este caso una computadora. Siendo la función del 74LS04, adaptar una señal de 0 – 5V a una señal de 0 – 3V.

A continuación presentamos una breve descripción de los componentes usados en esta parte de la tarjeta y de su funcionamiento:

El primer componente que describiremos es el integrado 74LS04. Este es un integrado de 14 pines, de los cuales 2 son para alimentación y tierra, los otros 12 se usan como entradas y salidas; este integrado es un inversor lógico o negador lógico que cuenta con 6 inversores. El 74LS04 sirve como interfaz de transmisión y recepción para las señales Rx, Tx, DTR y RTS.

Cuando el modulo XBee transmita los datos recibidos inalámbricamente, gracias al 74LS04 se puede llevar a cabo la comunicación serial con el procesador; como se ve en la Figura 4.6, la comunicación entre el XBee y la PC se realiza gracias a este integrado.

Debemos tener en cuenta que este integrado está trabajando a 3.3V de alimentación, siendo esta alimentación lo que permite la conexión entre los niveles de la PC y XBee, ya que trabajan a diferentes voltajes. El cable que se utiliza entre la placa receptora y la PC es un cable USB-SERIAL (HL-340), se debe instalar el driver de este cable, el cual viene al comprarlo o se encuentra en internet.

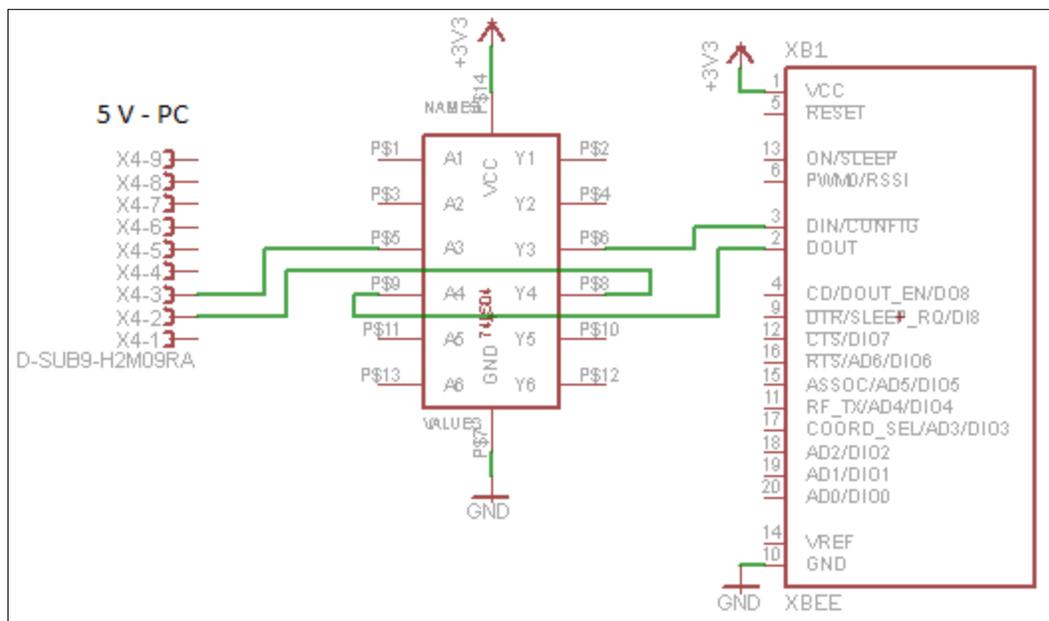


Figura 4.6. Conexión mediante el 74LS04 entre el XBee y PC para Rx y Tx

Los pines del integrado presentan el siguiente funcionamiento:

- **VCC:** Voltaje de alimentación.
- **GND:** Tierra
- **1A, 2A, 3A, 4A, 5A, 6A:** Entradas del NOT.
- **1Y, 2Y, 3Y, 4Y, 5Y, 6Y:** Salidas del NOT.

Existen unos integrados como el SP3203E o el MAX3232, los cuales funcionan en un rango de 3.3V a 5.5V de alimentación; estos trabajan bajo el protocolo de comunicación RS-232, de esta manera no habría problemas para la comunicación entre el XBee y la PC.

A continuación daremos una pequeña información acerca del SP3203E ya que es menos conocido que le MAX3232.

En la Figura 4.7 podemos ver la configuración de pines del integrado antes descrito:

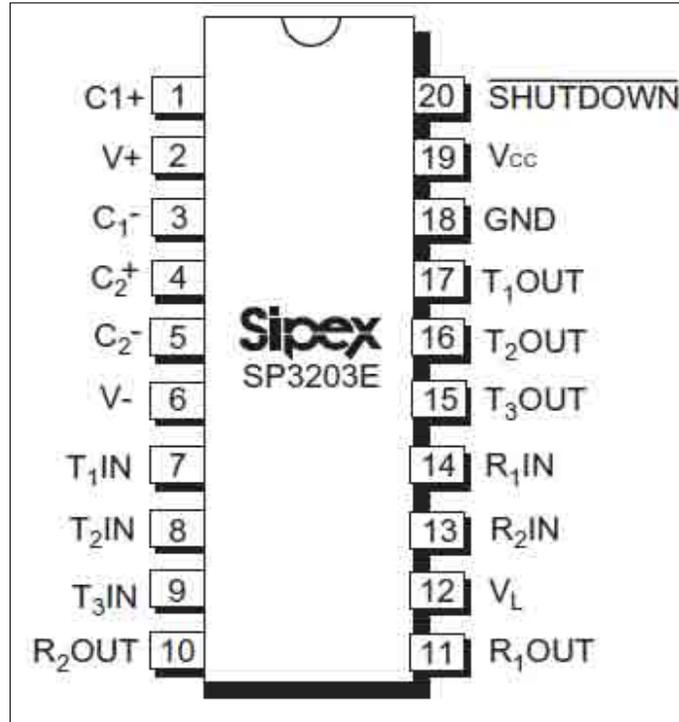


Figura 4.7. Vista en planta del integrado SP3203E

Los pines del integrado presentan el siguiente funcionamiento:

- **C1+**: Terminal positivo del doblador de voltaje de carga del condensador C1.
- **V+**: Salida generada regulada a +5.5V por la bomba de carga..
- **C1-**: Terminal negativo del doblador de voltaje de carga del condensador C1.
- **C2+**: Terminal positivo del doblador de voltaje de carga del condensador C2.
- **C2-**: Terminal negativo del doblador de voltaje de carga del condensador C2.
- **V-**: Salida generada regulada a -5.5V por la bomba de carga.
- **T1_{in}, T2_{in}, T3_{in}, R1_{out}, R2_{out}**: Conexiones a niveles de voltaje TTL o CMOS.
- **T1_{out}, T2_{out}, T3_{out}, R1_{in}, R2_{in}**: Conexiones a niveles de voltaje del protocolo RS-232.
- **V_L**: Selección del voltaje de alimentación para los niveles lógicos.

- **VCC:** Voltaje de alimentación entre +3.0V a +5.5V.}
- **GND:** Tierra.
- **SHUTDOWN:** Aplicar a la lógica baja a cerrar los conductores y bomba de carga.

4.2.2. Etapa de Alimentación

A continuación en la Figura 4.8, se presenta el circuito que representa la etapa de Alimentación en nuestra tarjeta de recepción implementada:

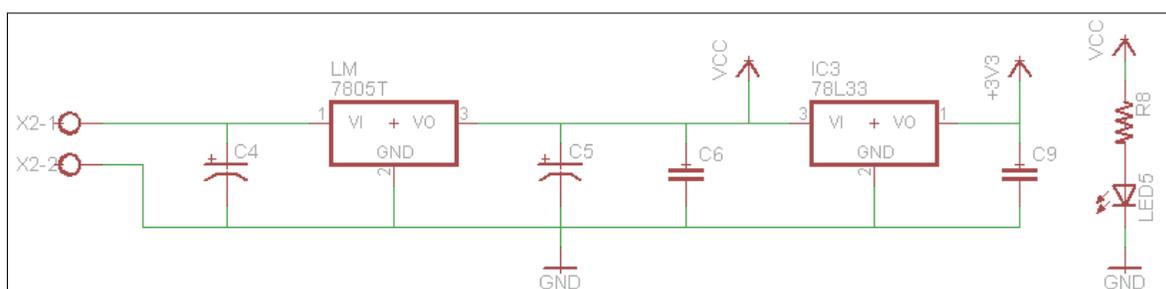


Figura 4.8. Circuito de la Etapa de Alimentación

Los componentes usados para esta parte de la tarjeta son descritos a continuación:

- **LM7805:**

Es un regulador de voltaje de tres terminales, capaz de entregar corriente de hasta 1 A en su terminal de salida; el voltaje mínimo que puede tener en su pin de entrada es de 6VDC y el máximo es de 35VDC, el voltaje en su terminal de salida oscila entre 4.8 y 5.2 VDC. Para la tarjeta desarrollada, el voltaje necesitado es de 5VDC.

- **78L33:**

Este es un regulador de voltaje de tres terminales; este es un regulador lineal de la familia 78XX. Funciona con cualquier fuente de 5 VDC o más. Regula a 3.3 VDC, que es lo que se necesita para poder alimentar a nuestro modulo de transmisión XBee.

- **Condensadores**

Sirven para eliminar ruidos y distorsiones de la señal externa de alimentación de nuestro circuito. Gracias a ellos tenemos siempre el voltaje con las características necesarias como para asegurar un óptimo funcionamiento del microprocesador.

- **Resistencias y Diodo LED (Light Emitting Diode)**

Como podemos apreciar en el diagrama, la resistencia y el respectivo diodo están puestos en paralelo a la carga que se va alimentar, por lo que su función es la de señalar los instantes de funcionamiento de la Etapa de Alimentación.

4.2.3. Etapa de Recepción

La recepción de los datos se realizara por el modulo XBee, el cual será estudiado más adelante.

4.2.4. Lista de Componentes

A continuación se presenta la Tabla 4.2, en la que podemos apreciar los distintos componentes de la tarjeta de recepción de datos implementada:

Tabla 4.2. Elementos usados en la tarjeta de recepción de datos

Elementos	Cantidad
Bornera de 2 pines	2
Regulador 7805	1
Regulador 78L33	1
Resistencias de 330 Ω	2
Resistencias de 1 kΩ	1
Condensadores cerámicos 104	2
Condensador 100uF 25V	1
Condensador 10uF 25V	1
Pulsadores	1
Diodo LED	3
Socket 7-2	1
Pines para XBee	20
Conector serial	1

4.3. PIC16F873

Existe una gran variedad de modelos de microcontroladores, que poseen una gran versatilidad, velocidad, bajo costo, bajo consumo de potencia y gran disponibilidad de herramientas para su programación.

A continuación se verán las diversas características del microcontrolador “PIC16F873”. También se tratarán las funciones básicas como lo es la configuración para la entrada y salida de información.

La Figura 4.9, nos muestra el diagrama de bloques del PIC16F873.

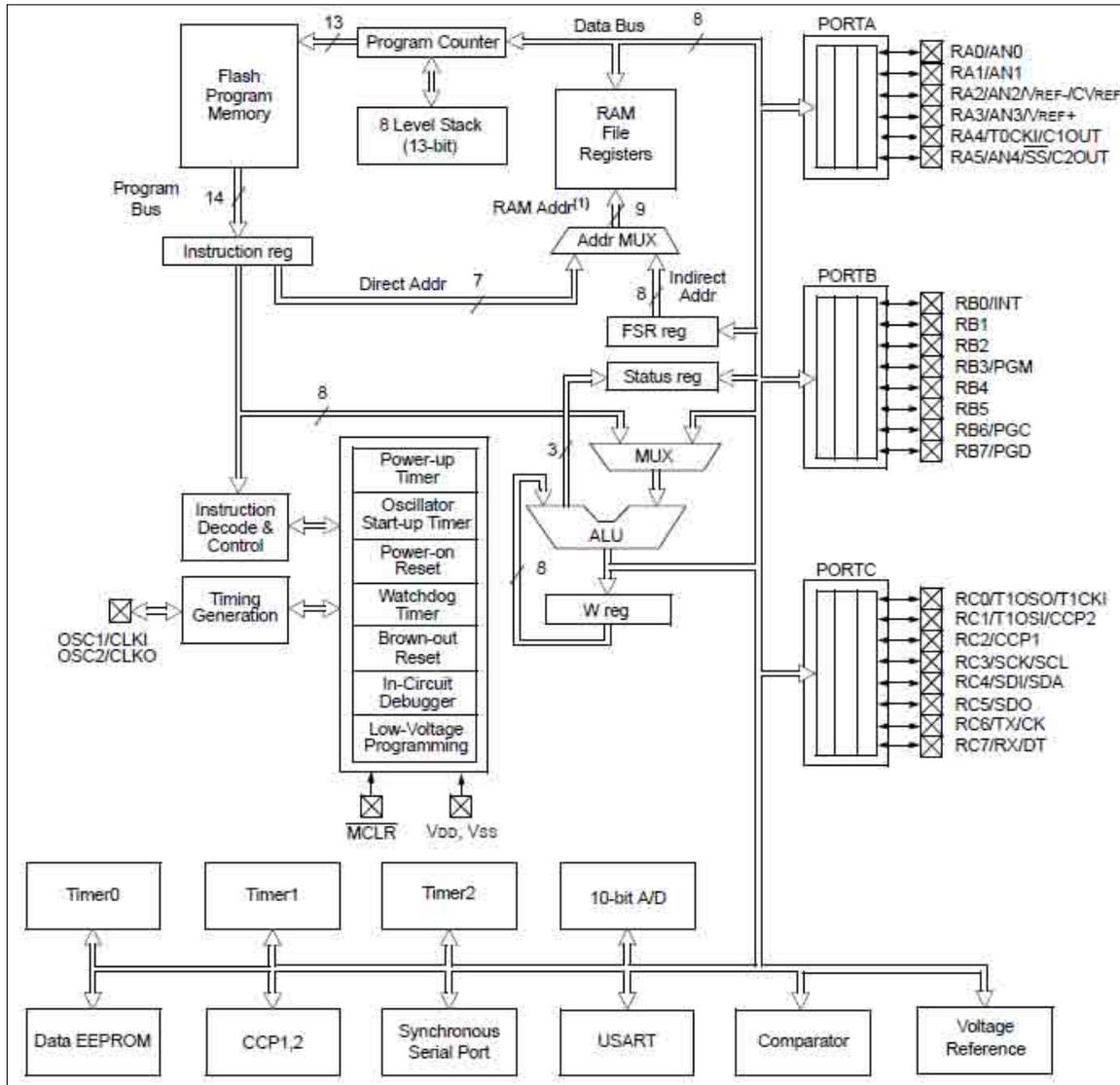


Figura 4.9. Diagrama de Bloques del PIC16F873

4.3.1. Descripción del PIC16F873

El PIC16F873 es un microcontrolador de Microchip, el cual tiene las características que se muestran en la Tabla 4.3.

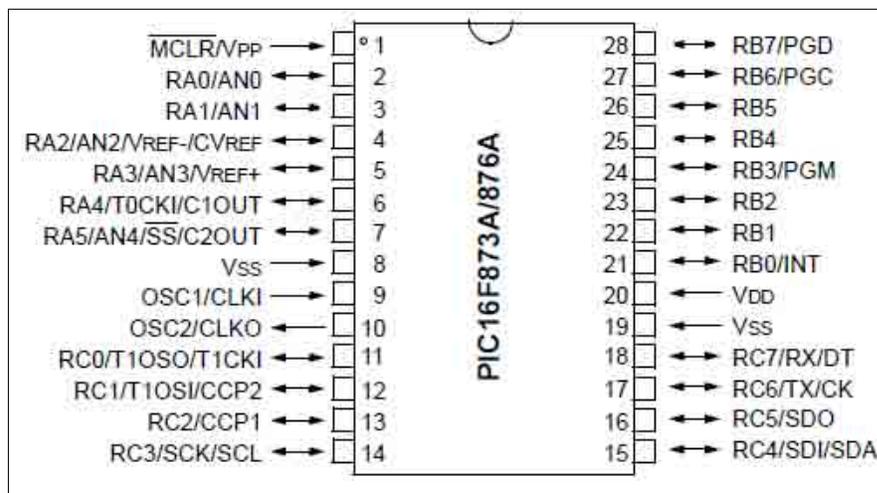
Tabla 4.3. Características del PIC16F873

Características	Descripción
Frecuencia de operación	20MHz
Memoria Flash de programa (palabra de 14 bits)	4k
Memoria de datos (bytes)	192
Memoria de datos EEPROM (bytes)	128
Interrupciones	13
Puertos de E/S	Puertos A, B,C
Temporizadores	3
Módulos de Captura/Comparación/PWM	2
Comunicación serial tipo	MSSP, USART
Módulo Análogo-Digital (10 bits)	5 canales de entrada
Conjunto de instrucciones	35

Debida a las características podemos ver que el PIC es muy útil para el desarrollo de diferentes aplicaciones tales como control y procesamiento digital de señales.

4.3.2. Entradas y salidas digitales

En la Figura 4.10, se presenta el encapsulado del PIC16F873 de 28 pines:

**Figura 4.10 Vista en planta de la configuración de pines del PIC16F873**

La Tabla 4.4 que se muestra a continuación, nos muestra la configuración predeterminada que tiene el PIC16F873.

Tabla 4.4. Configuración de los pines del PIC16F873

Nombre del pin	Pin	Tipo	Descripción
OSC1/CLKIN	9	E	Entrada de oscilador de cristal.
OSC2/CLKOUT	10	S	Salida de oscilador de cristal.
MCLR/VPP/THV	1	E/S	Reset o entrada de voltaje de programación.
RA0/AN0	2	E/S	PUERTO A es un puerto bidireccional de E/S. RA0 También puede ser entrada analógica 0. RA1 También puede ser entrada analógica 1. RA2 También puede ser entrada analógica 2 o referencia analógica de voltaje negativo. RA3 También puede ser entrada analógica 3 o referencia analógica de voltaje positivo. RA4 Puede ser también la entrada de reloj de módulo Temporizador 0. RA5 También puede ser entrada analógica 4 o esclavo en la selección de puertos serial síncrono.
RA1/AN1	3	E/S	
RA2/AN2/VREFF	4	E/S	
RA3/AN3/VREFF+	5	E/S	
RA4/TOCKI	6	E/S	
RA5/SS/AN4	7	E/S	
RB0/INT	21	E/S	
RB1, RB2	22-23	E/S	
RB3, PGM	24	E/S	
RB4, RB5	25-26	E/S	
RB6/PGC	27	E/S	
RB7/PGD	28	E/S	
RC0/T1OSO/T1CKI	11	E/S	PUERTO C es un puerto bidireccional de E/S. RC0 Puede ser la salida del oscilador Timer1 o entrada de reloj de Timer1. RC1 Puede ser la entrada del oscilador Timer1 o entrada de Captura2/salida de Captura2/PWM2. RC2 entrada Captura1/salida Comparado1/salida PWM1. RC3 Puede ser entrada reloj de reloj de sincronía serial. RC4 Puede ser entrada de dato SPI (en modo SPI). RC5 Puede ser salida de dato SPI (en modo SPI). RC6 Puede ser pin de transmisión USART. RC7 Puede ser pin de recepción USART.
RC1/T1OSI/CCP2	12	E/S ST	
RC2/CCP1	13	E/S	
RC3/SCK/SCL	14	E/S	
RC4	15	E/S	
RC5	16	E/S	
RC6/TX/CK	17	E/S	
RC7/RX/DT	18	E/S	
VSS	8,19		Referencia de tierra.
VDD	20		Fuente positiva.

Leyenda: E: entrada, S: Salida, ST: entrada Schmitt Trigger.

4.3.3. Organización de memoria

Hay tres bloques de memoria en este PIC los cuales son: memoria FLASH de programa, memoria de Datos (RAM) y memoria EEPROM de datos. Debido a las aplicaciones que se tratan, solo es necesario conocer la memoria de Datos (RAM).

4.3.3.1. Memoria de datos (RAM)

La memoria de datos esta particionada en múltiples bancos de los cuales contiene Registro de Propósito General y Registros de Funciones Especiales. Los bits RP1 (STATUS(6)) y RP0 (STATUS(5)) son usados para la selección del banco.

Tabla 4.5. Bits para la selección de banco

RP1:RP0	Banco
00	0
01	1
10	2
11	3

Cada banco se extiende hasta la dirección 7Fh (128 bytes). La parte baja de cada banco es reservada para los Registros de Funciones Especiales. Los Registros de Propósito General pueden ser accedados cada uno directamente, o indirectamente.

En la Figura 4.11, se muestra la conformación de los bancos.

File Address		File Address		File Address		File Address	
Indirect addr. ⁽¹⁾	00h	Indirect addr. ⁽¹⁾	80h	Indirect addr. ⁽¹⁾	100h	Indirect addr. ⁽¹⁾	180h
TMR0	01h	OPTION_REG	81h	TMR0	101h	OPTION_REG	181h
PCL	02h	PCL	82h	PCL	102h	PCL	182h
STATUS	03h	STATUS	83h	STATUS	103h	STATUS	183h
FSR	04h	FSR	84h	FSR	104h	FSR	184h
PORTA	05h	TRISA	85h		105h		185h
PORTB	06h	TRISB	86h	PORTB	106h	TRISB	186h
PORTC	07h	TRISC	87h		107h		187h
PORTD ⁽¹⁾	08h	TRISD ⁽¹⁾	88h		108h		188h
PORTE ⁽¹⁾	09h	TRISE ⁽¹⁾	89h		109h		189h
PCLATH	0Ah	PCLATH	8Ah	PCLATH	10Ah	PCLATH	18Ah
INTCON	0Bh	INTCON	8Bh	INTCON	10Bh	INTCON	18Bh
PIR1	0Ch	PIE1	8Ch	EEDATA	10Ch	EECON1	18Ch
PIR2	0Dh	PIE2	8Dh	EEADR	10Dh	EECON2	18Dh
TMR1L	0Eh	PCON	8Eh	EEDATH	10Eh	Reserved ⁽²⁾	18Eh
TMR1H	0Fh		8Fh	EEADRH	10Fh	Reserved ⁽²⁾	18Fh
T1CON	10h		90h		110h		190h
TMR2	11h	SSPCON2	91h				
T2CON	12h	PR2	92h				
SSPBUF	13h	SSPADD	93h				
SSPCON	14h	SSPSTAT	94h				
CCPR1L	15h		95h				
CCPR1H	16h		96h				
CCP1CON	17h		97h				
RCSTA	18h	TXSTA	98h				
TXREG	19h	SPBRG	99h				
RCREG	1Ah		9Ah				
CCPR2L	1Bh		9Bh				
CCPR2H	1Ch	CMCON	9Ch				
CCP2CON	1Dh	CVRCON	9Dh				
ADRESH	1Eh	ADRESL	9Eh				
ADCON0	1Fh	ADCON1	9Fh				
	20h		A0h		120h		1A0h
General Purpose Register		General Purpose Register		accesses 20h-7Fh		accesses A0h - FFh	
96 Bytes		96 Bytes			16Fh		1EFh
	7Fh		FFh		170h		1F0h
Bank 0		Bank 1		Bank 2	17Fh	Bank 3	1FFh

Figura 4.11. Mapa de los bancos del PIC16F873

4.3.4. Puertos de entrada y salida

Los PICs tienen la características de que sus pines pueden ser todos configurados de acuerdo a la necesidad de la aplicación, es decir, que los pines de un mismo puerto pueden ser usados unos como entradas y otros como salidas.

Además, algunos pines E/S de los puertos son multiplexados a una función alternativa de características periféricas. En general, cuando una función de estas es habilitada, ese pin tal vez no pueda ser usado como un pin de propósito E/S.

4.3.4.1. Puerto A y el registro TRISA

El puerto A es un puerto bidireccional con un ancho de 6 bits. La correspondiente dirección de datos es el registro TRISA. Al puerto A le corresponde la dirección 05h del banco 0, en tanto que al registro TRISA le corresponde la misma dirección pero del banco 1. Si queremos que el puerto A funcione como entrada de datos debemos poner los correspondientes bits del registros TRISA en 1, en cambio, si queremos que dicho puerto funcione como salida debemos colocar los del registro TRISA a 0.

4.3.4.2. Puerto B y el registro TRISB

El puerto B es un puerto bidireccional con un ancho de 8 bits. LA correspondiente dirección de datos es el registro TRISB. Al puerto B le corresponde la dirección 06h del banco 0, en tanto que al registros TRISB le corresponde la misma dirección pero del banco 1.

La configuración del puerto B se realiza de la misma forma que el puerto A, solo que ahora se manipula el registro TRISB.

4.3.4.3. Puerto C y el registro TRISC

El puerto C es un puerto bidireccional con un ancho de 8 bits. La correspondiente dirección de datos es el registro TRISC. Al puerto A le corresponde la dirección 07h del banco 0, en tanto que al registro TRISC le corresponde la misma dirección pero del banco 1.

La configuración del puerto C se realiza de la misma forma que el puerto A, solo que ahora se manipula el registro TRISC.

4.3.5. Convertidor Analógico Digital

Convertir una señal analógica a digital es una de las ventajas de este microcontrolador. El PIC16F873 cuenta con un módulo llamado “Convertidor Analógico a Digital (A/D)” para poder efectuar esta actividad.

Los sensores son capaces de mandar señales analógicas que cambian con el tiempo, estas señales son de un voltaje que varía normalmente de 0 a 5V. Esta es la señal que recibe el

convertidor A/D donde luego es procesada para convertirla a digital como se puede apreciar en la Figura 4.12:

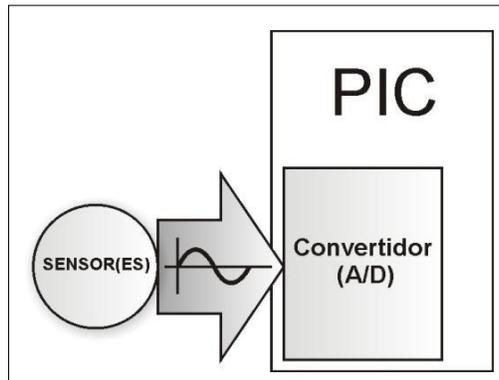


Figura 4.12. Esquema de la adquisición de la señal Analógica

Este módulo convertidor (A/D) tiene 5 entradas o canales. La entrada analógica carga una muestra y la mantiene en un capacitor. La salida del muestreo y la retención en el capacitor es la entrada al convertidor.

El convertidor entonces genera un resultado digital del nivel analógico por el método de aproximaciones sucesivas. La conversión Analógico-Digital de la entrada analógica resulta en un correspondiente número de 10 bits. El módulo A/D tiene entradas de referencia de alto voltaje (V_{DD}) y bajo voltaje (V_{SS}). Este módulo tiene la característica de que puede operar mientras el PIC se encuentra en el modo de bajo consumo de voltaje (SLEEP mode).

El módulo de conversión A/D está formado por cuatro registros, Estos registros son:

- Registro de resultado parte alta (ADRESH).
- Registro de resultado parte baja (ADRESL).
- Registro de control0 (ADCON0).
- Registro de control1 (ADCON1).

El registro ADCON0, se muestra en la Figura 4.13, controla la operación del módulo A/D. El registro de control ADCON1 se muestra en la Figura 4.14, este configura las funciones de los pines del puerto. Los pines del puerto pueden ser configurados como entradas analógicas (RA3 también puede ser la referencia de voltaje) o como E/S digitales.

R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	U-0	R/W-0
ADCS1	ADCS0	CHS2	CHS1	CHS0	GO/DONE	—	ADON
bit 7							bit 0
bit 7-6 ADCS1:ADCS0: Bits de selección de reloj de conversión							
ADCON1 <ADCS2>		ADCON0 <ADCS1:ADCS0>		Clock Conversion			
0		00		Fosc/2			
0		01		Fosc/8			
0		10		Fosc/32			
0		11		Frc (clock derived from the internal A/D RC oscillator)			
bit 5-3 CHS2:CHS0: Bits de selección de canal analógico							
000 = Channel 0 (AN0)							
001 = Channel 1 (AN1)							
010 = Channel 2 (AN2)							
011 = Channel 3 (AN3)							
100 = Channel 4 (AN4)							
bit 2 GO/DONE: Bits de estado de conversión							
When ADON = 1:							
1 = Conversión en progreso							
0 = Conversión terminada (Reestablecido automático por hardware)							
bit 1 Unimplemented: Read as '0'							
bit 0 ADON: Bits de encendido							
1 = A/D Módulo está operando							
0 = A/D Módulo está en bajo consumo de corriente							

R = bit leíble
W = bit escribible
U = bit no implementado leído como 0

Figura 4.13. Registro de control ADCON0

R/W-0	R/W-0	U-0	U-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
ADFM	ADCS2	—	—	PCFG3	PCFG2	PCFG1	PCFG0
bit 7				bit 0			

R = bit leible
W = bit escribible
U = bit no implementado leido como 0

bit 7 **ADFM: A/D Selección del formato de resultado**
1 = Justificación a la derecha. Los 6 más significativos de ADRESH son leídos como 0
0 = Justificación a la izquierda. Los 6 menos significativos de ADRESL son leídos como 0

bit 6 **ADCS2: A/D Bits de selección de reloj de conversión**

ADCON1 <ADCS2>	ADCON0 <ADCS1:ADCS0>	Clock Conversion
0	00	Fosc/2
0	01	Fosc/8
0	10	Fosc/32
0	11	Frc (clock derived from the internal A/D RC oscillator)

bit 5-4 **No implementados leídos como 0**

bit 3-0 **PCFG3:PCFG0: A/D Bits para la configuración del puerto**

PCFG <3:0>	AN4	AN3	AN2	AN1	AN0	VREF+	VREF-	C/R
0000	A	A	A	A	A	VDD	VSS	8/0
0001	A	VREF+	A	A	A	AN3	VSS	7/1
0010	A	A	A	A	A	VDD	VSS	5/0
0011	A	VREF+	A	A	A	AN3	VSS	4/1
0100	D	A	D	A	A	VDD	VSS	3/0
0101	D	VREF+	D	A	A	AN3	VSS	2/1
011x	D	D	D	D	D	—	—	0/0
1000	A	VREF+	VREF-	A	A	AN3	AN2	6/2
1001	A	A	A	A	A	VDD	VSS	6/0
1010	A	VREF+	A	A	A	AN3	VSS	5/1
1011	A	VREF+	VREF-	A	A	AN3	AN2	4/2
1100	A	VREF+	VREF-	A	A	AN3	AN2	3/2
1101	D	VREF+	VREF-	A	A	AN3	AN2	2/2
1110	D	D	D	D	A	VDD	VSS	1/0
1111	D	VREF+	VREF-	D	A	AN3	AN2	1/2

A = Entrada analógica
D = Digital E/S
C/R = # de canal de entrada analógica/# de voltaje de referencia A/D

Figura 4.14. Registro de control ADCON1

Los registros ADRESH:ADRESL, contienen los 10 bits del resultado de la conversión A/D. Cuando el proceso de conversión A/D esta completo el resultado es cargado en este par de registros, el bit GO/DONE (ADCON0(2)) es limpiado.

Después de que el módulo A/D ha sido configurado como se desea, la selección del canal debe ser realizada antes de iniciar la conversión. Los canales analógicos deben tener sus correspondientes bits TRIS seleccionados como entrada.

En los siguientes pasos se muestra como realizar la conversión:

1. Configuración del módulo A/D:

- Seleccionar los canales de entrada, voltaje de referencia y E/S digitales (ADCON1).
 - Seleccionar el canal de entrada A/D (ADCON0).
 - Seleccionar reloj de conversión (ADCON0).
 - Encender el módulo A/D (ADCON0).
2. Espera el tiempo requerido de adquisición.
 3. Iniciar conversión.
 4. Espera el proceso de conversión por:
- Limpieza del bit GO/DONE (ADCON0).
5. Leer el resultado en el par de registros (ADRESH:ADRESL).
 6. Para la siguiente conversión repita el paso 1 e inicie la conversión.

Selección del reloj de Conversión A/D: La fuente de reloj para la conversión A/D es seleccionada por software. Las cuatro posibles opciones son:

- $2T_{OSC}$
- $8T_{OSC}$
- $32T_{OSC}$
- Internal RC oscillator

La Tabla 4.6, muestra la frecuencia máxima de operación del reloj seleccionado para el convertidor A/D.

Tabla 4.6. Máximas frecuencias de operación

Operación	ADCS1:ADCS0	Max. Frecuencia
$2T_{OSC}$	00	1.25 MHz
$8T_{OSC}$	01	5 MHz
$32T_{OSC}$	10	20 MHz
RC	11	

Registro de resultado A/D: El par de registro ADRESH:ADRESL es la locación donde es cargado el resultado de 19 bits de la conversión A/D. El par de registros presenta un ancho de 16 bits. El módulo A/D ofrece la flexibilidad de justificar el resultado de 10 bits a la derecha o a la izquierda: El bit de selección del formato del resultado es el bit de control ADFM

La Figura 4.15, muestra la operación de justificación. Los bits extras son leídos como ceros.

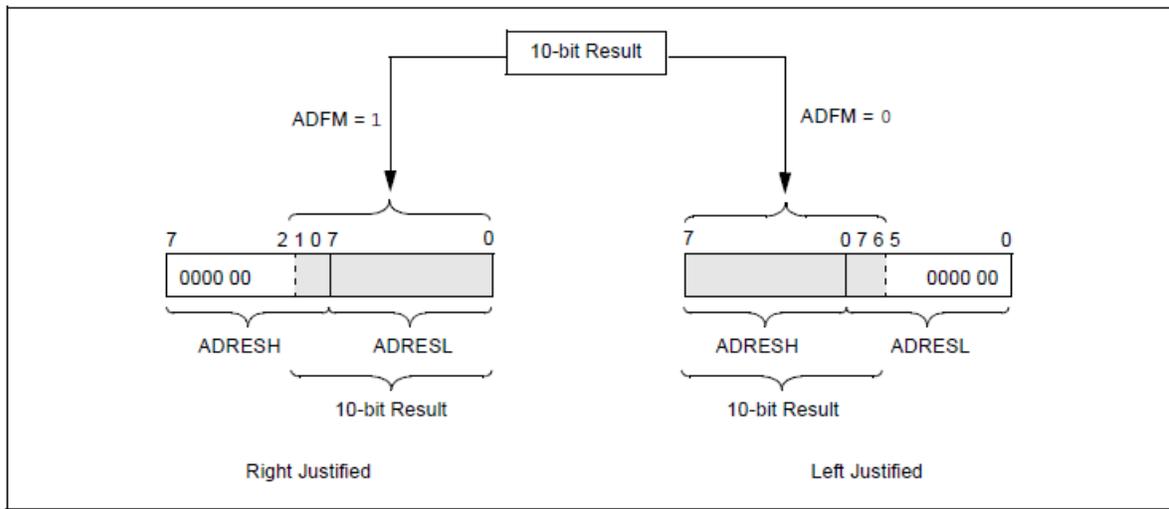


Figura 4.15. Operación de Justificación

Además, cuando en este par de registro no se escribe (conversión A/D deshabilitada), estos registros pueden ser usados como dos registros de 8 bits de propósito general.

4.3.6. Especificaciones del PIC16F873

4.3.6.1. Características mecánicas

La Figura 4.16 nos muestra las variables de las dimensiones del PIC16F873. Y en la Tabla 4.7, que se muestra luego, podemos ver las medidas expresadas en “pulgadas” y “milímetros”, además de la tolerancia de manufactura de todas las dimensiones.

Tabla 4.7. Medidas expresadas en pulgadas y milímetros del PIC16F873

Variables	Pulgadas			Milímetros		
	MIN	NOM	MAX	MIN	NOM	MAX
n		28			28	
p		.100			2.54	
A	.140	.150	.160	3.56	3.81	4.06
A2	.125	.130	.135	3.18	3.30	3.43
A1	.015			0.38		
E	.300	.310	.325	7.62	7.87	8.26
E1	.275	.285	.295	6.99	7.24	7.49
D	1.345	1.365	1.385	34.16	34.67	35.18
L	.125	.130	.135	3.18	3.30	3.43
c	.008	.012	.015	0.20	0.29	0.38

B1	.040	.053	.065	1.02	1.33	1.65
B	.016	.019	.022	0.41	0.48	0.56
eB	.320	.350	.430	8.13	8.99	10.92
α	5	10	15	5	10	15
β	5	10	15	5	10	15

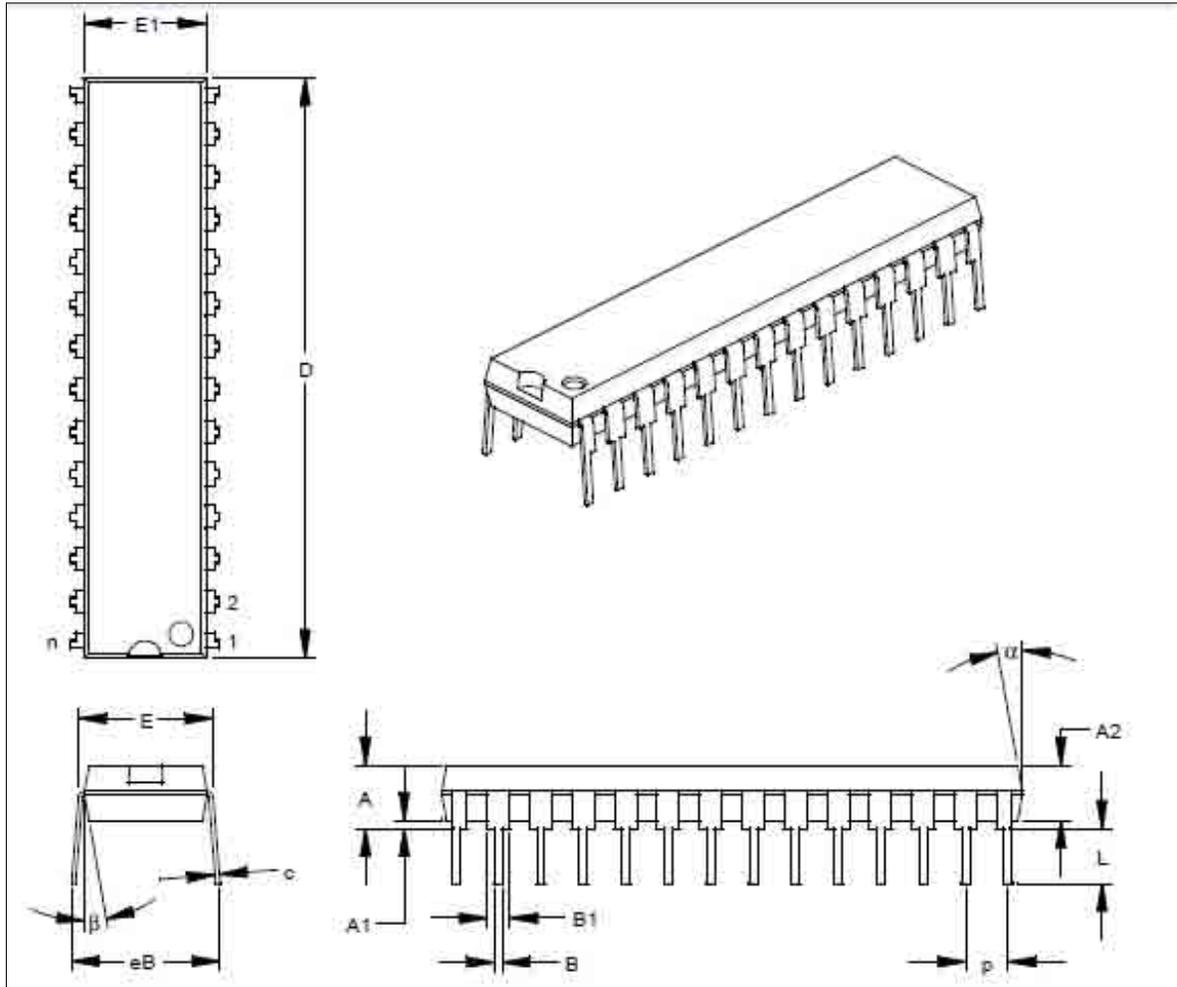


Figura 4.16. Dimensiones del PIC16F873

4.3.6.2. Características Eléctricas

En la Tabla 4.8, se muestra las características eléctricas para el PIC16F873 operando a 5V sobre una temperatura recomendada de 25°C. Si se presentara condiciones de operación que excedan a las que se detallan en la siguiente tabla, podrían generarse daños en el PIC.

Tabla 4.8. Características Eléctricas

Características Eléctricas	
Temperatura ambiente bajo sesgo	-55 a +125°C
Temperatura de almacenamiento	-65 a +150°C
Voltaje en cualquier pin con respecto a V_{SS} (excepto V_{DD} , MCLR. Y RA4)	-0.3V a (V_{DD} +0.3V)
Voltaje en V_{DD} con respecto a V_{SS}	-0.3 a +7.5V
Voltaje en MCLR con respecto a V_{SS}	0 a +14V
Voltaje en RA4 con respecto a V_{SS}	0 a 8.5V
Total de energía disipada	1.0W
Corriente de salida máxima del pin V_{SS}	300 mA
Corriente de entrada máxima del pin V_{DD}	250 mA
Corriente de entrada de pinza, I_{IK} ($V_I < 0$ o $V_I > V_{DD}$)	+/- 20 mA
Corriente de salida de pinza, I_{OK} ($V_O < 0$ o $V_O > V_{DD}$)	+/- 20 mA
Máxima corriente de alimentación de salida por cualquier pin I/O	25 mA
Máxima corriente para los PUERTOS A y B	200 mA
Máxima corriente para los PUERTOS C	200 mA

4.4. Modulo XBee

El módulo XBee con el trabajamos es el modelo XB24-AWI-001 de la firma Digi, este es un módulo de serie 1, fueron construidos para trabajar con necesidades de bajo costo, baja potencia de consumo en redes inalámbricas. Estos módulos requieren una mínima potencia y proveen de una entrega segura de datos entre dispositivos remotos.

A continuación se verán diversas características del módulo XBee.

4.4.1. Características

Estos dispositivos cuentan con una antena (antena whip)²⁷, la cual les permite un alcance en ambientes interiores aproximadamente de 30m y en espacios abiertos de 100m. Además poseen una potencia de salida de transmisión de 1 mW (0 dBm), además de otras características que serán descritas a continuación:

- **Relación precio con rendimiento:** Debido a las innovaciones incluidas en el diseño de los módulos XBee se obtuvieron beneficios en la calidad final del producto del rango de 2 a 3 veces sobre los módulos de competencia. Esto ha permitido que se cubran mayores extensiones de campo usando pocos dispositivos. Además los módulos XBee son fáciles de usar, de allí que, el costo del desarrollo de un sistema de datos se reduzca enormemente.

²⁷ Hace referencia a la antena tipo látigo.

- **Baja potencia de consumo:** Los módulos XBee utilizan poca potencia (45mA de corriente de Transmisión). Además el modo “sleep”, está disponible permitiendo corrientes que alcanzan valores inferiores a 10uA. Corriente de transmisión 45mA, de recepción 50mA a 3.3V.
- **Rango de integridad en la transmisión de datos:** Como se menciona este módulo cuenta con una antena (whip) que le permite un alcance en ambientes interiores de 30m y en ambientes exteriores hasta 100m. Su potencia de transmisión es de 1mW (0 dBm), corriente de recepción < 10uA; frecuencia de operación 2.4 GHz y velocidad de datos en RF 250, 000 bps.
- **Seguridad y redes:** Se usa el Espectro de Dispersión de secuencia Directa (DSSS-Direct Sequence Spread Spectrum). Cada canal de secuencia directa tiene sobre 65000 únicas direcciones de red habilitadas. Se puede direccionar el origen y destino, además de poseer comunicación unicast y broadcast (comunicación de 1 polo hacia todos). Soporta topologías Punto-punto, multipunto e igual a igual (peer to peer).
- **Soporte de líneas de entrada/salida y líneas análogo-digitales:** Posee módulo de conversión análogo-digital, entrada/salidas digitales y líneas de transferencia de entrada/salida.

4.4.2. Entradas y salidas digitales

En la Figura 4.17, podemos apreciar la configuración de los pines del módulo XBee de 20 pines con paso nominal de 2 milímetros.

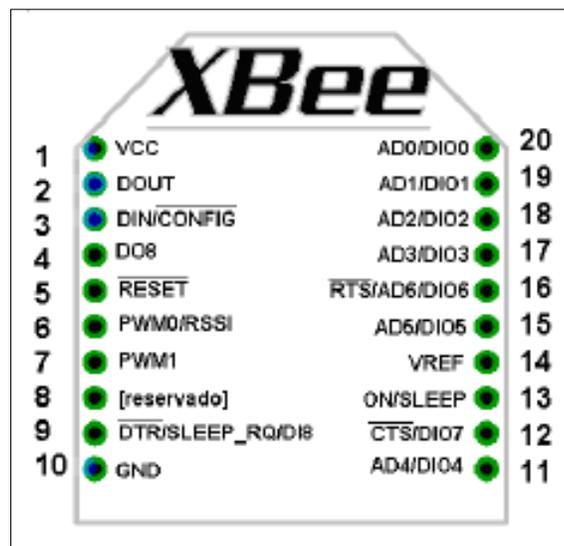


Figura 4.17. Vista en planta de la configuración de pines del módulo XBee

La Tabla 4.9 que se muestra a continuación, nos muestra la configuración predeterminada que tiene el módulo XBee.

Tabla 4.9 Configuración de pines del módulo XBee

Pin #	Nombre	Dirección	Descripción
1	VCC	-	Fuente de alimentación
2	DOUT	Salida	Salida de datos UART
3	DIN/CONFIG	Entrada	Entrada de datos UART
4	DO8	Salida	Salida digital 8
5	RESET	Entrada	Reseteo del modulo
6	PWM0/RSSI	Salida	Salida PWM 0/Indicador de señal larga Rx
7	PWM1	Salida	Salida PWM 1
8	[reservado]	-	No conectar
9	DTR/SLEEP_RQ/DI8	Entrada	Linea de control del pin Sleep o entrada digital 8
10	GND	-	Tierra
11	AD4/DIO4	Ambos	Entrada Análoga 4 o E/S digital 4
12	CTS/DIO7	Ambos	Control de flujo Clear-to-send o E/S digital7
13	ON/SLEEP	Salida	Iniciador de estado del módulo
14	VREF	Entrada	Voltaje de referencia para las entradas A/D
15	Associate/AD5/DIO5	Ambos	Indicador asociado. Entrada análoga 5 o E/S digital
16	RTS/AD6/DIO6	Ambos	Control de flujo Request-to-send, entrada análoga 6 o E/S digital 6
17	AD3/DIO3	Ambos	Entrada análoga 3 o Entrada/Salida digital 3
18	AD2/DIO2	Ambos	Entrada análoga 2 o Entrada/Salida digital 2
19	AD1/DIO1	Ambos	Entrada análoga 1 o Entrada/Salida digital 1
20	AD0/DIO0	Ambos	Entada análoga 0 o Entrada/Salida digital 0

4.4.3. Especificaciones del módulo XBee

4.4.3.1. Características mecánicas

Las figuras que se presentan a continuación nos muestran las dimensiones del módulo XBee.

Las medidas están expresadas en “pulgadas”, seguidas de su correspondiente valor en “milímetros” encerrado entre corchetes.

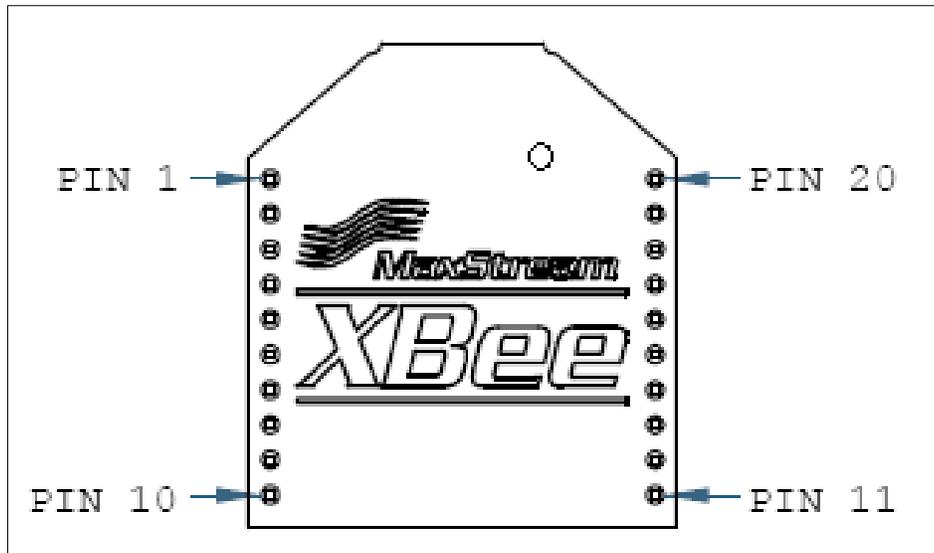


Figura 4.18 Vista en planta del módulo XBee

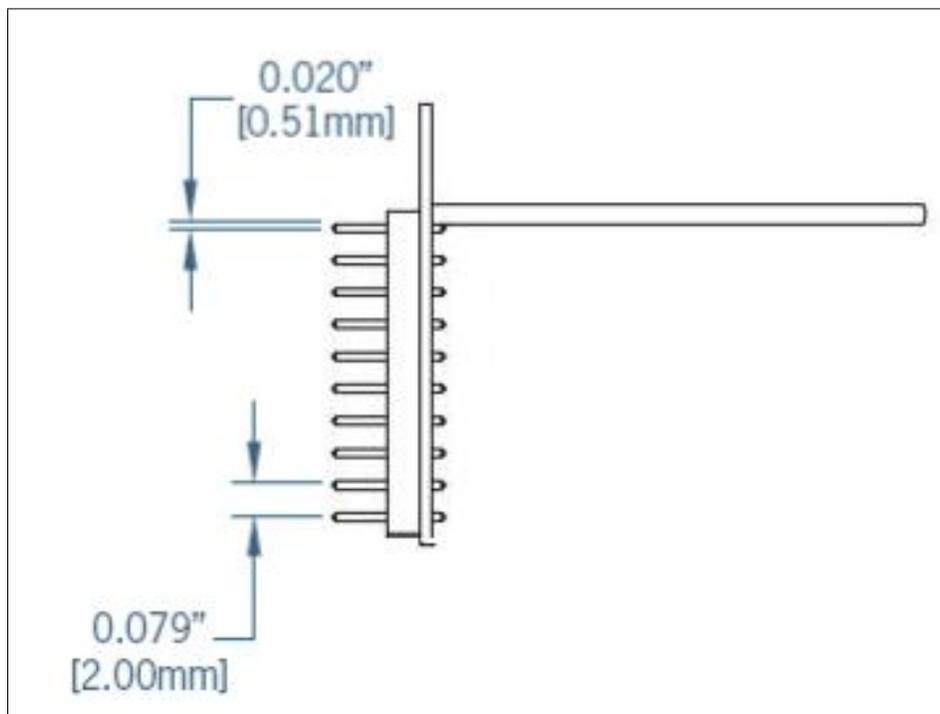


Figura 4.19 Vista lateral del módulo XBee

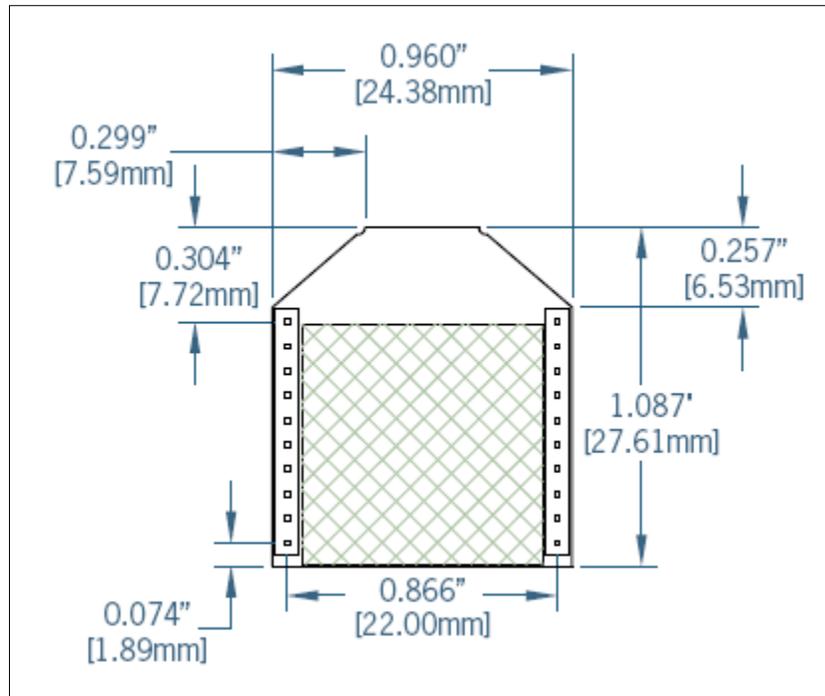


Figura 4.20 Vista inferior del módulo XBee

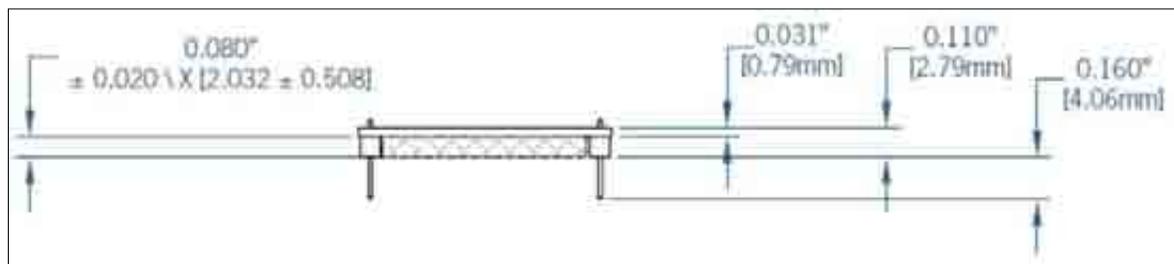


Figura 4.21 Vista lateral frontal del módulo XBee

4.4.3.1.1. Consideración de montaje

El módulo XBee fue diseñado para montarlo en su socket y así no requerir ninguna soldadura para montarlo sobre alguna placa. En esta tesis se aprovecha que el módulo tiene interface RS-232 para comunicar los datos adquiridos.

Debido a que no pudimos conseguir los sockets para el XBee, hemos usado los pines de unos socket normales, pero removiendo el plástico que separa a cada pin del otro, y funciona de igual manera como los sockets. Si se realiza esto, tener cuidado de que los pines no choquen entre ellos, ya que podría provocar un falso contacto. Esto se puede ver en las figuras del capítulo 3.

4.4.3.2. Características eléctricas

En las tablas que se muestran a continuación se pueden apreciar las características eléctricas para el módulo XBee, el cual opera a 3.3V. Si se presentara condiciones de operación que excedan a las que se detallan en las siguientes tablas, podrían generarse daños en módulo XBee.

Tabla 4.10. Características DC (VCC = 2.8 – 3.4 VDC)

Symbol	Characteristic	Condition	Min	Typical	Max	Unit
V _{IL}	Input Low Voltage	All Digital Inputs	-	-	0.35*VCC	V
V _{IH}	Input High Voltage	All Digital Inputs	0.7*VCC	-	-	V
V _{OL}	Output Low Voltage	I _{OL} = 2mA, VCC >= 2.7V	-	-	0.5	V
V _{OH}	Output High Voltage	I _{OH} =-2mA, VCC >= 2.7V	VCC-0.5	-	-	V
I _{IN}	Input Leakage Voltage	V _{IN} = VCC or GND, all inputs, per pin	-	0.025	1	uA
I _{OZ}	High Impedance Leakage Current	V _{IN} = VCC or GND, all I/O High-Z, per pin	-	0.025	1	uA
TX	Transmit Current	VCC = 3.3V	-	45	-	mA
RX	Receive Current	VCC = 3.3V	-	50	-	mA
PWR-DWN	Power-down current	SM parameter = 1	-	< 10	-	uA

4.4.3.3. Características técnicas

En la tabla que se muestran a continuación se pueden apreciar los detalles técnicos más importantes del módulo XBee.

Tabla 4.11. Detalles técnicos del módulo XBee

Funciones	
Tasa de datos	254 Kbps
Rango en interiores	30 m
Rango en exteriores	100 m
Potencia de transmisión	1mW (+0 dBm)
Sensibilidad del receptor (1% PER ²⁸)	-92 dBm
Características	
Interfaz de datos serial	3.3V CMOS UART
Métodos de configuración	Comandos AT o API
Banda de frecuencia	2.4 GHz
Inmunidad a la interferencia	DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)
Tasa de comunicación serial	1200bps a 250 Kbps
Conversores ADC	Conversores de 10 bit (hasta 7 disponibles) ²⁹
I/O Digitales	Hasta 8 disponibles
PWM (Pulse Width Modulation)	Hasta 2 disponibles
Opciones de antena	Chip, Wire chip, UFL y RPSMA
Dimensiones	0.960"x1.087" (2.438x2.761cm)
Temperatura de operación	-40 a 85°C (industrial)
Redes y Seguridad	
Encriptación	128 bits
Entrega confiable de paquetes	Retires/Acknowledgments (reintentos/aviso de recibo de paquetes)
ID's y canales	PAN ID (personal Area Network), 64-bit IEEE MAC, 16 canales.
Requerimientos de potencia	
Voltaje de alimentación	2.8 a 3.4 Vdc
Corriente de transmission	45mA @ 3.3 Vdc
Corriente de recepción	50 mA @ 3.3 Vdc
Corriente de apagado	< 10uA @ 25°C

²⁸ Packet Error Radio (tasa de paquetes erróneos).

²⁹ Pines compartidos entre las entradas/salidas digitales y analógicas.

Capítulo V

Descripción del software

5.1. MPLAB X

MPLAB X IDE (entorno de desarrollo integrado) es un programa desarrollador de aplicaciones para controladores Microchip y controladores de señales digitales. Se le llama IDE porque proporciona un ambiente integrado para desarrollo de códigos para microcontroladores embebidos. Este programa nos permite la escritura del software que deseamos instalar en el microcontrolador.

Esta parte del capítulo describirá las librerías y funciones relaciones para programar el PIC16F873.

5.1.1. Acerca del MPLAB X

MPLAB X IDE es un programa que se ejecuta en una PC (Windows, Mac OS, Linux) para desarrollar aplicaciones para microcontroladores Microchip. Este editor es modular, permite seleccionar los distintos microcontroladores soportados, además de permitir la grabación de estos circuitos integrados directamente al programador.

MPLAB X IDE trae muchos cambios para la cadena de herramientas de desarrollo del microcontrolador PIC. A diferencia de versiones desarrolladas anteriormente, MPLAB X se basa en el código abierto NetBeans IDE de Oracle. Esto ha permitido añadir muchas funciones más solicitadas de una manera rápida y sencilla que nos provee de una arquitectura más extensible, la cual mejorar con el tiempo.

5.1.2. Funciones del MPLAB X

Las funciones del MPLAB X pueden ser estudiadas con mayor profundidad en el “User Guide MPLAB X”.

5.1.3. Programación Implementada

El código compilado en el PIC16F873, se encargara de realizar la conversión de las señales de entrada enviadas por los sensores, de analógicas a digitales, además de transmitirlo por la USART del microcontrolador al XBee el cual transmite la información inalámbricamente.

Gracias a este código implementado, se activaran los pines del “PUERTO A” del microcontrolador como entrada y como salida la “USART” del microcontrolador que se encuentra en el “PUERTO C”. Los pines de entrada del “PUERTO A” están conectados a la entrada de los sensores o en este caso a los potenciómetros y la comunicación serial Tx y Rx en sus correspondientes del XBee.

A continuación se presenta una descripción de cada una de las partes componentes del programa compilado en el PIC16F873 que se usa para la transmisión de datos inalámbricamente.

5.1.3.1. Definición de los parámetros utilizados

En esta primera parte del programa se definen los parámetros que se utilizaran para poder trabajar, por ejemplo definimos el microcontrolador utilizado en este caso el PIC16F873, el cristal utilizado para el PIC y otras opciones.

- Librería <xc.h> (librería del PIC16F873).
- `_CONFIG(FOSC_XT & WDTE_OFF & PWRTE_OFF & BOREN_ON & LVP_OFF & CPD_OFF & WRT_OFF & CP_OFF)` (configuración de parámetros del PIC)
- `_XTAL_FREQ 4000000` (el tiempo para los delays utilizados).

5.1.3.2. Definición de los sub programas utilizados

Esta parte del programa implementado define a los subprogramas configuración de pines como entradas o salidas y configuración de la USART del microcontrolador.

- `void CONFIGURAR_PINES(void)` (sub programa configuración de pines)
- `void CONFIGURAR_USART(void)` (sub programa configuración USART)

Dentro del sub-programa configuración de pines se definen los siguientes parámetros:

- Comienza programa (void CONFIGURAR_PINES(void))
- Limpia el PUERTOA (PORTA = 0).
- Limpia el PUERTOB (PORTB = 0).
- Limpia el PUERTOC (PORTC = 0).
- Define las entradas analógicas (ADCON1 = 0B10000010);
- Define los pines como entradas analógicas (TRISA = 0B00111111)
- Define el PUERTOB como entrada (TRISB = 255)
- Define Rx y Tx en PUERTOC (TRISC = 0B10111111)

Dentro del sub-programa configuración de USART se definen los siguientes parámetros:

- Comienza programa (void CONFIGURAR_USART(void))
- Programa el Tx de la comunicación serial (TXSTA = 0B00100100)
- Programa el Rx de la comunicación serial (RCSTA = 0B10010000)
- Velocidad para transmisión de datos (SPBRG = 25)

5.1.3.3. Definición de los caracteres para el envío de datos

Envío estos caracteres por cada RTD usada, para poder luego en el programa de Visual Basic, poder procesar la información de una manera más sencilla:

- Declaro el mensaje para la RTD A (unsigned char Msg1[7] = {"POT1: "})
- Declaro el mensaje para la RTD B (unsigned char Msg2[7] = {"POT2: "})
- Declaro el mensaje para la RTD C (unsigned char Msg3[7] = {"POT3: "})
- Declaro el mensaje para la RTD D (unsigned char Msg4[7] = {"POT4: "})

5.1.3.4. Programa principal

Lo primero que hace esta parte del código es llamar a los subprogramas “configuración de pines” y “configuración USART”.

Después de hacer el llamado a los subprogramas y estar listo para transmitir, realiza la conversión analógica a digital de los datos recibidos por los sensores de temperatura, esto se hace como se explico Capítulo IV, Apartado 4.3.5. Entonces hace la recepción de las señales de los sensores, dependiendo en el orden que están conectados, comienza por el canal AD0 hasta el AD3, como mencionamos solo utilizamos 4 entradas y lo transmite por la USART del PIC.

Las líneas de código compiladas en el PIC para el funcionamiento de lo descrito líneas arriba, será presentadas en el Anexo IV.

5.2. X-CTU

El módulo XBee necesita de un firmware el cual especifica su funcionamiento. Para poder cargarlo es necesario el programa XCTU, este programa es proporcionado por la empresa Digi (fabricante del módulo XBee). Este software es la interfaz entre el XBee y el usuario, este firmware se puede descargar para el uso específico del XBee dependiendo de la función que se desee que cumpla.

La última versión del X-CTU contiene los últimos firmwares para el XBee, debido a esto solo se necesita revisar el historial de los firmwares para elegir el que se adapte a nuestras necesidades.

5.2.1. Acerca del X-CTU

X-CTU es una aplicación basada en Windows proporcionada por Digi. Este programa fue diseñado para interactuar con los archivos de firmware encontrados en los productos RF de Digi y ofrecer un fácil manejo de interface gráfica para el usuario.

Este software fue diseñado para funcionar con todos los sistemas Windows desde Windows 98 y superiores. X-CTU puede ser descargado desde la pagina de Digi o instalada con un CD.

5.2.2. Funciones del X-CTU

Las funciones del X-CTU pueden ser estudiadas con mayor profundidad en el “User Guide del X-CTU”.

5.2.3. Configuración del módulo XBee

Ya que trabajamos con el modelo XB24-AWI-001, y este modelo pertenece a la serie 1 solo podemos formar conexiones de punto a punto o de punto a multipunto, nosotros haremos una red de punto a multipunto.

5.2.3.1. Grabación del Firmware

Los módems de Digi soportan actualizaciones de firmware. El proceso de actualización requiere de una placa de interface, una computadora con Windows.

Una de las razones por las cuales es necesario actualizar el firmware es porque el programa X-CTU podría reportar el siguiente mensaje de error:

“Unable to find configuration file for modem. Please check website or call technical support for updates. Read parameters...Failed”.

Para la grabación del firmware en el módulo XBee se deben seguir los siguientes pasos:

- Elimina cualquiera copia vieja del X-CTU que puedes tener instalada en tu PC.
- Descarga la versión más reciente del X-CTU (www.digi.com/xctu.) e instálala.
- Conectar el XBee hacia el módulo de interfaz RS-232.
- Conectar el módulo hacia un puerto disponible COM de la PC.
- Abrir el programa X-CTU, cuando se instala se encuentra un icono en el escritorio de Windows.
- Una vez abierto en el tab PC-Settings del programa seleccionar el puerto correspondiente que reconoce la computadora, al cual ha sido conectado el módulo, seleccione el tipo de velocidad de transmisión, se encuentra con la velocidad de transmisión por defecto (módulos X_-009 usan 9600 bps por defecto, X_-019 = 19200 bps y X_-038 = 38400 bps, el XTend y todos los XBee por defecto trabajan a 9600). Dejamos las otras opciones en sus defectos (None, 8, None, 1, de arriba hacia abajo. Ser consciente del recuadro “Enable API”. Si existe firmware en el módulo se pone un check en el recuadro de API enabled, para poder así permitir comunicación entre X-CTU y el módulo. Si no sabes la existencia de algún firmware en el módulo tú necesitas probar este paso dándole check en el recuadro de API. Si no tuviste resultado, prueba de nuevo con el recuadro sin darle check. Si estas usando un interface USB, o un cable de conversión USB a serial, te ayudara dándole check al recuadro “No baud change” el cual se encuentra en la parte inferior izquierda del recuadro.
- Seleccione el tab “Modem Configuraton” y presiones “Read” para leer los parámetros con los que el XBee vino de fábrica (si el software es incapaz de encontrar la configuración, búscala manualmente seleccionando el tipo de modem del menú desglorable).
- Selecciona el deseado “Funcion set” y la “Versión” del firmware del respectivo menú desglorable.
- Presione “Write” para cargar el nuevo firmware.
- Presiona “Restore” defecto del módulo, para resetear el módulo.
- El firmware ya estará actualizado y grabado en el módulo XBee.

5.2.3.2. Configuración del módulo XBee como coordinador

Se usa el comando ATCE para establecer el papel de cada módulo en una red ZigBee. Cuando su valor es “1” configura al módulo como coordinador, también se puede emplear el comando ATA2 con el cual se configuran las diferentes opciones para crear una red.

En la Tabla 5.1, se pueden ver las opciones del comando ATA2, estas opciones determinan como el coordinador va a crear una red. En la figura 5.1, se muestra la terminal del programa X-CTU con los comandos que configuran al XBee como coordinador.

Tabla 5.1. Opciones del coordinador para crear una red

Bit	Opciones del coordinador
0 ReassingPanID	0. El coordinador no realiza un escaneo para ubicar un ID (identificador) PAN disponible. Operará con el identificador establecido por el usuario mediante el comando ATID.
	1. El coordinador realiza un escaneo para determinar un ID disponible. Si el ID establecido por el usuario tiene conflictos, el parámetro del comando ID cambiará
1 ReassingChannel	0. El coordinador no realiza un escaneo para determinar un canal libre. Operará en el canal establecido por el usuario mediante el comando ATCH.
	1. El coordinador realiza un escaneo para determinar un canal libre y operar en ese canal.
2 AllowAssociate	0. El coordinador no permitirá que ningún dispositivo se asocie a él.
	1. El coordinador permitirá a los dispositivos asociarse a él.
3-7	Reservados.

Las opciones que configuramos en el módulo XBee coordinador son:

Tabla 5.2. Opciones de configuración en el módulo XBee como coordinador

Comando	Respuesta	Descripción
+++	OK	Entro a modo comando.
ATNI coordinador	OK	Defino "coordinador" como nombre del módulo.
ATID 3332	OK	Defino PANID = 3332.
ATCH 10	OK	Defino canal = 10.
ATCE 1	OK	Defino al módulo como coordinador
ATA2 4	OK	4 = "0100" (hex) 0 = Defino que el coordinador solo opere con el identificador establecido (ATID = 3332) 0 = Defino que trabaje por el canal establecido (ATCH = 10) 1 = Defino que el coordinador permita a los dispositivos asociarse a él. 0 = Solo llena la combinación de bits.
ATWR	OK	Escritura de las modificaciones en el módulo.
ATCN	OK	Salgo del modo comando.

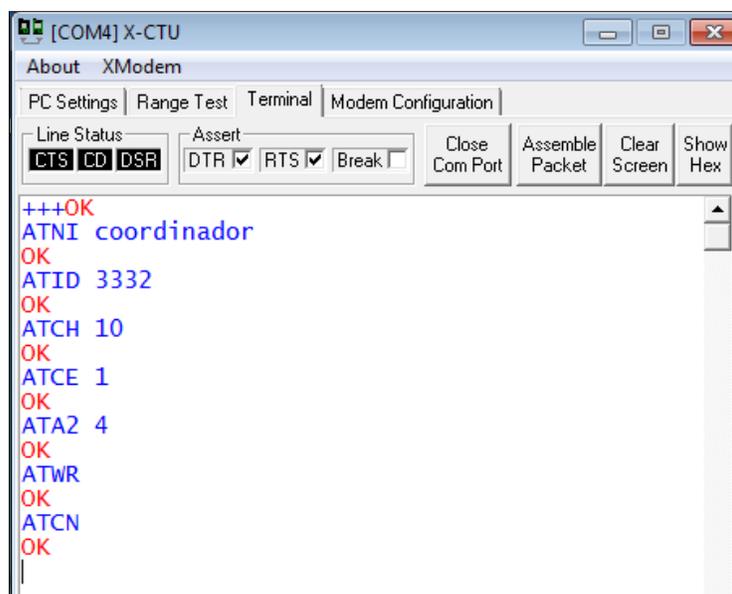


Figura 5.1. Configuración del módulo XBee coordinador

5.2.3.3. Configuración del módulo XBee como end device

Para poder configurar nuestro módulo XBee como dispositivo final debemos usar el comando ATCE con un valor de 0. Cabe el caso resaltar que los módulos XBee por defecto están configurados como dispositivos finales. También podemos usar el comando ATA1 para configurar el módulo.

En la Tabla 5.2, podemos ver las opciones que se pueden asignar al modulo configurado como dispositivo final para que se asocie a una red. Y en la Figura 5.2, se puede ver los comandos utilizados para realizar la configuración del dispositivo final mediante el programa X-CTU.

Tabla 5.3. Opciones del dispositivo final para asociarse a una red

Bit	Opciones del dispositivo final
0 ReassingPanID	0. Solo se asociará a un coordinador operando con el ID PAN que corresponde al parámetro del comando ATID.
	1. Puede asociarse con un coordinador operando con cualquier ID PAN.
1 ReassingChannel	0. Solamente se asociará a un coordinador operando con el canal que corresponde al parámetro del comando ATCH.
	1. Puede asociarse con un coordinador operando con cualquier canal.
2	0. El dispositivo no intentara asociarse.

AllowAssociate	1. El dispositivo intentara asociarse hasta conseguirlo.
3 PollCoordOnPinWake	0. El dispositivo no sondeará al coordinador para datos pendientes.
	1. El dispositivo enviará una solicitud para extraer cualquier dato pendiente.
4-7	Reservados.

Las opciones que configuramos en el módulo XBee dispositivo final son:

Tabla 5.4. Opciones configuradas en el módulo XBee como end device

Comando	Respuesta	Descripción
+++	OK	Entro a modo comando.
ATNI final1	OK	Defino "final1" como nombre del módulo.
ATID 3332	OK	Defino PANID = 3332 (debe ser el mismo que el módulo).
ATCH 10	OK	Defino canal = 10 (debe ser el mismo que el módulo).
ATCE 0	OK	Defino al módulo como dispositivo final.
ATA2 C	OK	C = "1100" (hex) 0 = Defino que se asocie al coordinador que opere con el identificador establecido (ATID = 3332) 0 = Defino que trabaje por el canal establecido (ATCH = 10) 1 = Defino que el dispositivo intente asociarse hasta conseguirlo. 1 = Dispositivo enviara solicitudes para extraer datos pendientes.
ATWR	OK	Escritura de las modificaciones en el módulo.
ATCN	OK	Salgo del modo comando.

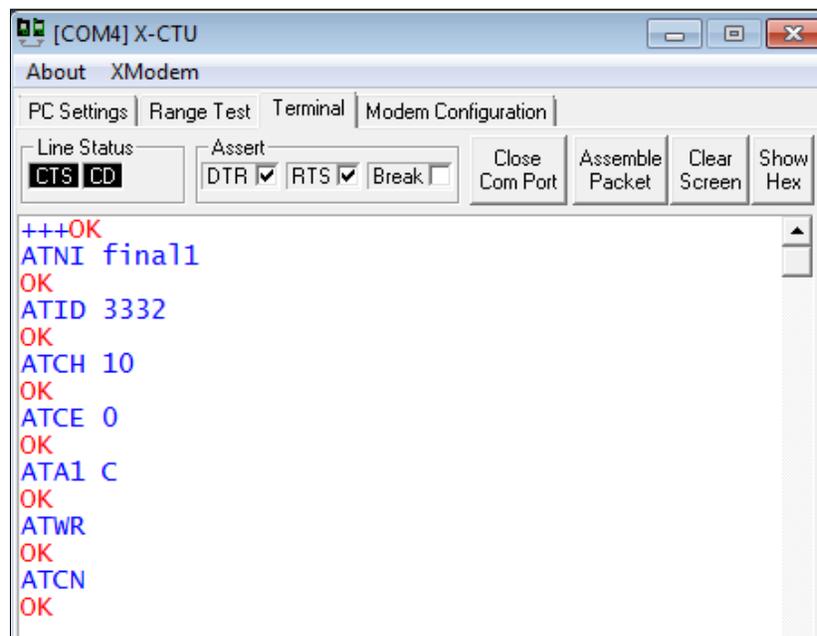


Figura 5.2. Configuración del módulo XBee como dispositivo final

5.3. Visual Basic 6.0

Visual Basic es un lenguaje de programación de los llamados “visuales”, ya que parte de la programación que se realiza con él se basa en la utilización de elementos visuales. La palabra visual hace referencia al método que se utiliza para crear la interfaz gráfica de usuario. En lugar de escribir numerosas líneas de código para describir la apariencia y ubicación de los elementos de la interfaz, simplemente agregamos objetos prefabricados en su lugar dentro de la pantalla, los cuales nos ahorran mucho tiempo de programación y que sobrepasan el concepto de la programación convencional en cuanto a la estructura secuencial del programa.

Esta parte del capítulo describirá el código e interface utilizada para el procesamiento de la información de temperatura recibida del proceso hidrotérmico.

5.3.1. Acerca de Visual Basic 6.0

Visual Basic es un lenguaje de programación dirigido por eventos, desarrollado por Alan Cooper para Microsoft. Este lenguaje de programación es un dialecto de BASIC³⁰, con importantes agregados. Su primera versión fue presentada en 1991, con la intención de simplificar la programación utilizando un ambiente de desarrollo completamente gráfico que facilitara la creación de interfaces gráficas y, en cierta medida, también la programación misma.

Visual Basic contiene un entorno de desarrollo integrado (IDE) que integra: editor de textos para edición del código fuente, un depurador, un compilador (y enlazador) y un editor de interface gráficas

5.3.2. Funciones del Visual Basic 6.0

Las funciones del Visual Basic 6.0 pueden ser estudiadas con mayor profundidad en el “Visual Basic 6.0, Manual de Usuario”.

5.3.3. Programa Implementado

El programa implementado en Visual Basic 6.0, consta de la interfaz gráfica utilizada y el código implementado para el procesamiento de los datos recibidos. Se hablara de las dos partes implementadas a continuación.

³⁰ Beginner's All-purpose Symbolic Instruction Code; en español: Código simbólico de instrucciones todo-propósito para principiantes.

5.3.3.1. Interfaz gráfico

En la Figura 5.3, vemos la interfaz del programa implementado en Visual Basic 6.0, en esta interfaz tenemos cuatro recuadros que muestran las temperaturas para cada RTD utilizada. Para este caso hemos tomado 4 RTDs, desde la RTD-A hasta la RTD-D.

Además encontramos una pestaña desplegable en la cual podemos elegir el COM a utilizar y el botón “CONECTAR”.

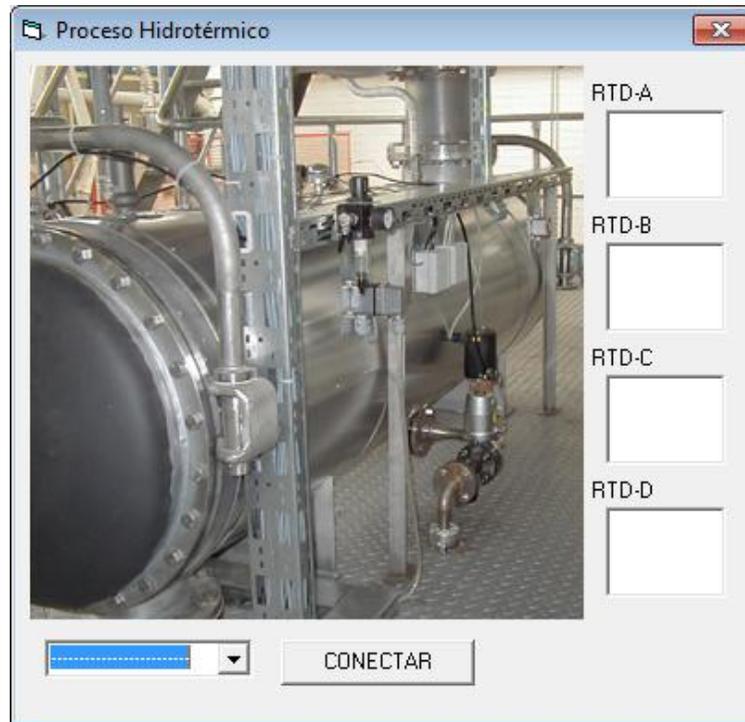


Figura 5.3. Interfaz gráfica del programa implementado

En el Anexo III, se hablará sobre el funcionamiento del programa, además de darse una descripción más detallada sobre el programa y su Código implementado.

5.3.3.2. Código Implementado

El código utilizado en el programa Visual Basic 6.0, se encarga de recibir los datos proporcionados por el XBee coordinador, que está conectado a la PC; procesa la información para que esta pueda ser visualizada como datos de temperatura.

A continuación se presenta una descripción de cada una de las partes componentes del código implementado en el programa Visual Basic 6.0.

- **Declaración de variables**

En esta primera parte del programa se definen las variables a utilizar:

- Declaro variables como cadenas (Dim ____ As String).
- Declaro variables como integradores (Dim ____ As Integer).
- Declaro variables como byte (Dim ____ As Byte).

- **Conectar / Desconectar, comunicación serial**

En esta parte del código, programo el botón ya agregado como “Conectar”, para que realice la comunicación serial y pueda recibir los datos transmitidos. Además una vez conectado aparece “DESCONECTAR”, para terminar la comunicación entre la tarjeta de recepción de datos y la PC. Antes de desconectarse pregunta si desea proseguir o anular la acción.

- Indica que la programación se realizó en el botón “CONECTAR” (Private Sub cmdcon_Click()).
- Crea un bucle si damos clic en “CONECTAR” (If cmdcon.Caption = "CONECTAR" Then).
- Selecciona el puerto llamado (puerto.CommPort = Val(cmbssel.ListIndex + 1)).
- Abre el puerto seleccionado (puerto.PortOpen = True).
- (puerto.InputLen = 20).
- Activa el código del timer agregado (Timer1.Enabled = True).
- Muestra “DESCONECTAR” en el botón (cmdcon.Caption = "DESCONECTAR").
- Crea un bucle si damos clic en “DESCONECTAR” (If cmdcon.Caption = "DESCONECTAR" Then).
- Muestra mensaje de “SI” o “No” (msgRet = MsgBox("ESTA CERRANDO CESION" & vbCrLf & _ "¿Desea desconectar?", vbQuestion + vbYesNo, "Aviso").
- Crea bucle al responder “Si” (If msgRet = vbYes Then).
- Desactiva el time (Timer1.Enabled = False).
- Desconecta el puerto seleccionado (puerto.PortOpen = False).
- Muestra “CONECTAR” en el botón (cmdcon.Caption = "CONECTAR").
- Termina bucle (End If).
- Termina rutina (End Sub).

- **Recepción y exposición de datos**

En esta parte del código, programamos para que los datos sean visibles en los “labels” agregados para cada sensor RTD (A-D); así como el arreglo para que puedan ser vistos como temperaturas con una escala de -25°C a 100°C.

Conclusiones

- En este trabajo de tesis se ha introducido al estándar basado en ZigBee empleando los módulos XBee modelo XB24-AWI-001, siendo esta una herramienta versátil para transmisión de datos. Los datos transmitidos se pueden visualizar gracias a una interfaz realizada en Visual Basic. Los módulos XBee dan la posibilidad de trabajar en una interface Serial-ZigBee-Microcontrolador, lo cual se ha desarrollado en el proyecto. Además se describieron las generalidades asociadas al estándar, sus limitaciones y su comparativo con otros conocidos, disponibles en el mercado, como son Bluetooth y WiFi.
- Los sistemas inalámbricos, son una herramienta de alta eficiencia para la implementación de procesos. Por medio de estos sistemas y sus dispositivos que nos permiten la transmisión, podemos evitar el cableado, y tener mayor flexibilidad. Por ejemplo, en el caso específico de la tesis presentada, las tarjetas de comunicación implementadas, pueden transmitir y recibir los datos de temperatura del proceso hidrotérmico, evitando así el cableado para la transmisión de los datos medidos. En nuestro caso los datos son transmitidos por medio inalámbrico gracias a los módulos XBee y su protocolo de transmisión ZigBee. De esta manera se tendrá una simplificación significativa en relación al cableado requerido para la instalación, además de mejorar las condiciones del proceso.
- Para la transmisión de temperaturas en el proceso hidrotérmico, el cual se estudió en esta tesis, no se necesita grandes velocidades ya que dicho proceso tiene una tolerancia de hasta 5 segundos en las medidas que realiza; siendo los módulos XBee implementados aptos para satisfacer las necesidades que requiere el sistema. Debemos tener en cuenta que las velocidades de transmisión de datos en estos módulos, depende de la distancia a la que se encuentran los dispositivos; si se tiene una distancia aceptable de trabajo, no se tendrá ningún tipo de inconveniente con estos módulos y se podrá controlar el proceso sin problemas. Se recomienda el trabajo de los módulos XBee en campo abierto, ya que así se puede aprovechar al máximo su rango de alcance. Además si se requiere un mayor alcance de transmisión, se pueden utilizar los dispositivos XBee-PRO, lo cuales tienen como rango en interiores 100m y en exteriores 1200m aproximadamente. También se debe tener en

cuenta que estos dispositivos tienen la capacidad de aumentar su rango de acción, con el uso de repetidores, los cuales reciben y envían los datos, de esta manera el alcance podría ser mayor, brindándole así al sistema mayor robustez. Recordemos que hemos usado módulos de la Serie1 los cuales tienen limitaciones, si se desea mayor alcance u otro tipo de topología se puede trabajar con los de la Serie2.

- Los sistemas inalámbricos de transferencia de datos, como el que se presenta en esta tesis nos da la capacidad de poder implementar una red de comunicación segura, evitando cableado. Los requerimientos de nuestro sistema, pueden variar, dependiendo de la cantidad de datos que se manejen, lo cual vendría en la modificación del microcontrolador, que sea capaz de poder manejar mayor cantidad de entradas analógicas. Pero, si no se contara con esta tecnología, tendremos que realizar el cableado independiente desde los tanques hidrotérmicos hasta el procesador, restándole confiabilidad a nuestras instalaciones. Además se podría implementar un sistema para el control del proceso, así se tendría una implementación completa y eficiente.
- Las pruebas que se realizaron para la simulación de tomas de temperatura con el potenciómetro fueron con un voltaje de 5V, si se quiere mayor exactitud se puede usar una fuente de corriente fija. Para situaciones de mayor precisión se debe usar el RTD con el acoplador de señal en el cual está el XTR105.
- El uso de Visual permitió la rápida integración de todo el sistema, dando un fácil manejo y sobre todo permitiendo un monitoreo eficiente y en tiempo real.
- La mejora de los procesos en la industria, requiere un incremento de confianza del cliente hacia el producto, de esta manera se podría lograr una mayor competitividad frente a las exigencias del mercado, las cuales son cada vez mayores. Además las mejoras implementadas, no solo consiguen una solución tecnológica a bajo costo en el proceso, sino que ayudamos a cambiar la mentalidad en la agroindustria, con relación a que las implementaciones electrónicas son costosas y poco confiables.
- En las soluciones propuestas, el caso dos, nos da una integración independiente entre cada RTD utilizada y el módulo XBee, para esta implementación se debe tener en cuenta que los niveles de trabajo del módulo XBee son de 0V a 3V y por lo tanto se tiene que realizar una etapa de adaptación de señal.
- Resumiendo, se implementó satisfactoriamente en este trabajo, un sistema de comunicación inalámbrica donde se evita el excesivo cableado para la transmisión de datos. Se pudo trabajar con microcontroladores, sensores, módulos inalámbricos, instrumentación virtual. Lo cual fue importante debido a que la aplicación de la instrumentación inalámbrica en este tipo de sistemas abre la posibilidad de hacerlos más flexibles y robustos.

Referencias bibliográficas

Libros

- Shahin Farahani. “ZigBee Wireless Networks and Transceivers”. Newnes books; 2008.

Hojas técnicas

- EXAR-Powering Connectivity, SP3203E 3V RS-232 serial transceiver with Logic Selector and 15kV ESD Protection. “Datasheet”.
- Microchip, PIC16F87XA. “Datasheet”.
- Digi, XBee/XBee-PRO; DigiMesh 2.4RF Modules. “Datasheet”.
- MCI electronics, XBEE Series1. “User’s Guide”.
- Texas Instrument, XTR105, 4-20mA current transmitter with sensor excitation and linearization. “Datasheet”.
- Microchip, MPLAB X IDE, “User’s Guide”.
- Digi, X-CTU Configuration & Test Utility Software, “User’s Guide”.
- Microsoft, Visual Basic 6.0, “Manual de Usuario”.
- Publicación Número 34970-90003 (orden del manual 34970-090101) Edición 3, “User’s Guide”.

Páginas Web

- XBee Firmware, Disponible en:
<http://www.digi.com/support/productdetail?pid=3257&osvid=0>
- Specification. Disponible en:
<http://www.zigbee.org/>
- ZigBee/IEEE® 802.15.4 Standards and Architecture Overview. Disponible en:
www.freescale.com/files/training_pdf/28081_ZIGBEE_OVERVIEW_WBT.pdf
- Protocolo ZigBee (IEEE 802.15.4). Disponible en:
<http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/1109/1/InformeTecZB.pdf>

- XBee 802.15.4 Module. Disponible en:
<http://www.digi.com/support/productdetail?pid=3257>
- Datasheet de componentes electrónicos y semiconductores. Disponible en:
www.datasheetcatalog.net
- X-CTU. Disponible en:
<http://www.digi.com/support/productdetail?pid=3352>
- MPLAB X. Disponible en:
<http://www.microchip.com/pagehandler/en-us/family/mplabx/>
- Comunicaciones Serie (HW). Disponible en:
<http://www.learobotics.com/proyectos/cuadernos/ct1/ct1.html>
- WIFI. Disponible en:
<http://www.wi-fi.org/>
- Sensores de temperatura: RTD. Disponible en:
http://gifna.unizar.es/wikisensors/index.php/Sensores_de_temperatura:_RTD
- Callendar + Van Dusen Modelo de Medición RTD. Disponible en:
<http://www.metas.com.mx/guiametas/La-Guia-MetAs-09-09-CVD.pdf>
- Estudio de las principales técnicas de modulación para canal de radio. Disponible en:
http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/alvarado_s_ja/capitulo_5.html#
- Estándar de Comunicación. Disponible en:
<http://es.kioskea.net/>
- Protocolos de comunicaciones. Disponible en:
<http://www.desarrolloweb.com/articulos/1617.php>
- Historia de la Redes Inalámbricas. Disponible en:
<http://histinf.blogs.upv.es/2010/12/02/historia-de-las-redes-inalambricas/>
- Visual Basic. Disponible en:
http://es.wikipedia.org/wiki/Visual_Basic
- Visual Basic 6.0. Disponible en:
<http://www.slideshare.net/Dunkherz/manual-visual-basic-60>

Anexo I

A continuación se presentan fotografías de los elementos que conforman la solución implementada para la transmisión de datos inalámbricamente, también se presentaremos fotos de las placas en funcionamiento.



Foto AI.1. Tarjeta acondicionadora de señal de 4 – 20mA, donde se conecta el sensor de temperatura (RTD).



Foto AI.2. Módulo de transmisión inalámbrica XBee, el cual nos permite comunicar bajo el protocolo ZigBee.



Foto AI.3. Tarjeta de transmisión de datos, sobre el cual se monta el módulo de transmisión inalámbrica XBee.



Foto AI.4. Tarjeta de recepción de datos, el cual sirve como interfaz entre el XBee y el procesador (para este caso una PC), sobre el cual se monta el módulo de transmisión inalámbrica XBee.

El led rojo nos dice que la tarjeta está alimentada y el led amarillo nos dice que el XBee está activo.



Foto A1.7. Tarjeta de recepción de datos alimentada a 5V



Foto A1.8. Tarjeta de recepción de datos conectada a la computadora.



Foto AI.9. Tarjeta de transmisión de datos alimentada con una pila de 9V.



Foto AI.10. Prueba de transmisión inalámbrica de temperatura con el potenciómetro.



Foto AI.11. Diodo led verde encendido, representando la recepción de los datos inalámbricamente.

Anexo II

A continuación se presenta una guía rápida para el software X-CTU con el cual configuramos los módulos XBee, podremos ver sus características más importantes.

Este software se descarga gratuitamente de la página de Digi. Este software cuenta con cuatro ventanas principales:

- **PC Settings:** En esta ventana se configura el formato de la trama serial para comunicarse con el módulo.
- **Range Test:** Permite visualizar de una manera rápida y sencilla el alcance de transmisión del módulo.
- **Terminal:** Desde aquí se configura al módulo mediante los comandos AT, también se envían o reciben tramas de y hacia la UART del módulo.
- **Modem Configuration:** Es la interfaz visual desde la cual se configuran los parámetros del módulo, sin necesidad de conocer los comandos AT. Además desde esta ventana se hace la actualización del firmware.

Ahora mostraremos algunas de las características más importantes del programa.

AII.1.- PC Settings

En la Figura AII.1, podemos ver la interfaz principal del programa, en esta ventana podemos configurar el baud rate, el tipo de control de flujo, los bits de datos, la paridad y el bit de paro. Por defecto aparecen los valores que se observan en la figura mencionada, siendo estos valores los adecuados para establecer comunicación con el módulo XBee.

En esta ventana también se muestran los puertos que reconoce la computadora para poder comunicarse serialmente. Cuando llega una trama al módulo XBee, este la reconoce como datos o comandos para él. Si son datos los radia, si son comandos los interpreta y se configura o responde, pero esta información no es transmitida. Una manera para enviar una trama de información de y hacia otros módulos XBee se conoce como API (Application Programming Interface). Esta opción también se activa en esta ventana. Por omisión se tiene la opción de modo de comandos AT.

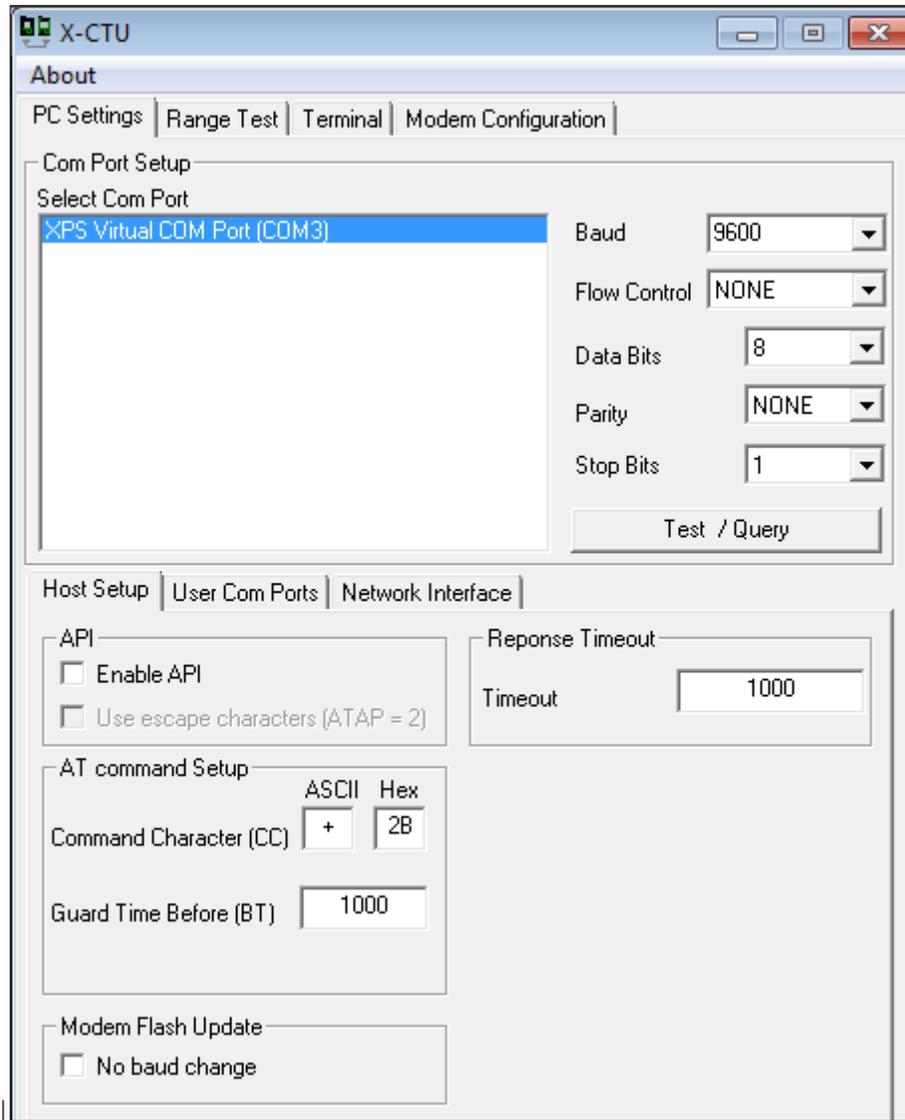


Figura AII.1. Interfaz principal del programa X-CTU

El botón Test / Query, nos ayuda a identificar el módulo que está conectado al puerto COM seleccionado. Si existe un problema en la comunicación, el programa muestra un mensaje de error como se puede ver en la Figura AII.2. Si esto sucede debemos verificar que el módulo esté conectado correctamente, o que el baud rate sea de 9600. Después la comunicación debería realizarse sin problemas y se debe mostrar una ventana con los datos del tipo de módulo conectado, así como la versión de firmware que tiene programada, de forma similar a lo que se ve en la Figura AII.3.

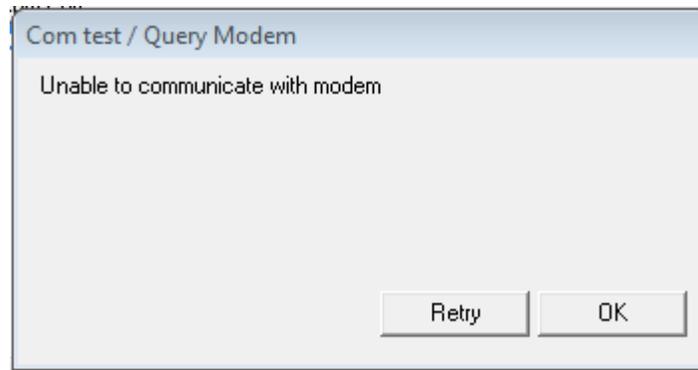


Figura AII.2. Mensaje de error

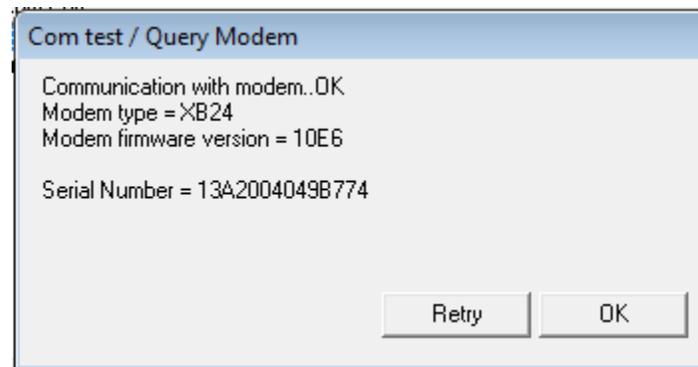


Figura AII.3. Mensaje con información del módulo

AII.2.- Range Test

En esta ventana podemos verificar la calidad del enlace de RF, de la señal recibida por el módulo XBee conectado a la PC. En la Figura AII.4, se muestra esta interfaz mencionada. Si queremos iniciar la prueba, debemos pulsar el botón "Start", si habilitamos la casilla del RSSI se tiene un indicador gráfico del nivel de la señal recibida. Para realizar esta prueba se necesitan dos módulos, para que se comuniquen entre ellos.

En la Figura AII.5 se muestra cuando se realiza esta prueba. La gama de colores va de rojo (sin conexión) a verde (nivel de señal fuerte). Para finalizar la prueba se debe pulsar el botón STOP.

AII.3.- Terminal

En esta ventana podemos enviar comandos AT o información por el puerto COM hacia el módulo XBee. Para iniciar los comandos AT se escribe la secuencia “+++”, a la cual el módulo responde con “OK”, esto indica que el módulo interpretara los datos recibidos como comandos. La Figura AII.6 muestra lo mencionado.

Debemos aclarar que el módulo XBee tiene especificado un tiempo de espera antes de salir del modo comando, este tiempo se establece con el comando CT. Si durante este tiempo no se ingresa ningún comando válido, automáticamente el módulo sale del modo de comandos. También podemos salir de este modo con el comando ATCN.

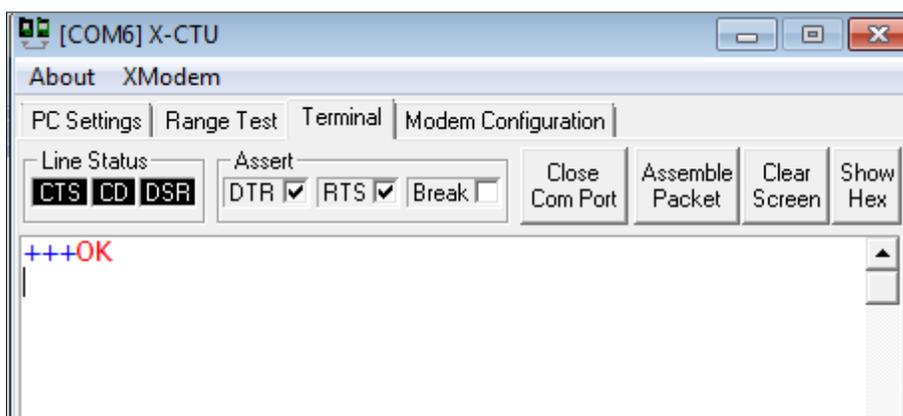


Figura AII.6. Ventana Terminal para configurar mediante comandos AT

AII.4.- Modem Configuration

En esta ventana podemos actualizar el firmware, el cual debe corresponder con el tipo de configuración deseado, por parte del módulo XBee. La versión del firmware restringe el empleo de determinados comandos AT.

El firmware se puede obtener de la página de Digi, o si ya se bajó previamente, de un archivo. El programa puede realizar las dos acciones mencionadas. Para esto debemos pulsar el botón “Download new versions...”, esto se puede apreciar en la Figura AII.7; si queremos tomar el archivo desde la PC, debemos seleccionar la opción file, con el botón Web se conectara a internet para hacer la búsqueda y posteriormente la descarga de alguna actualización disponible.

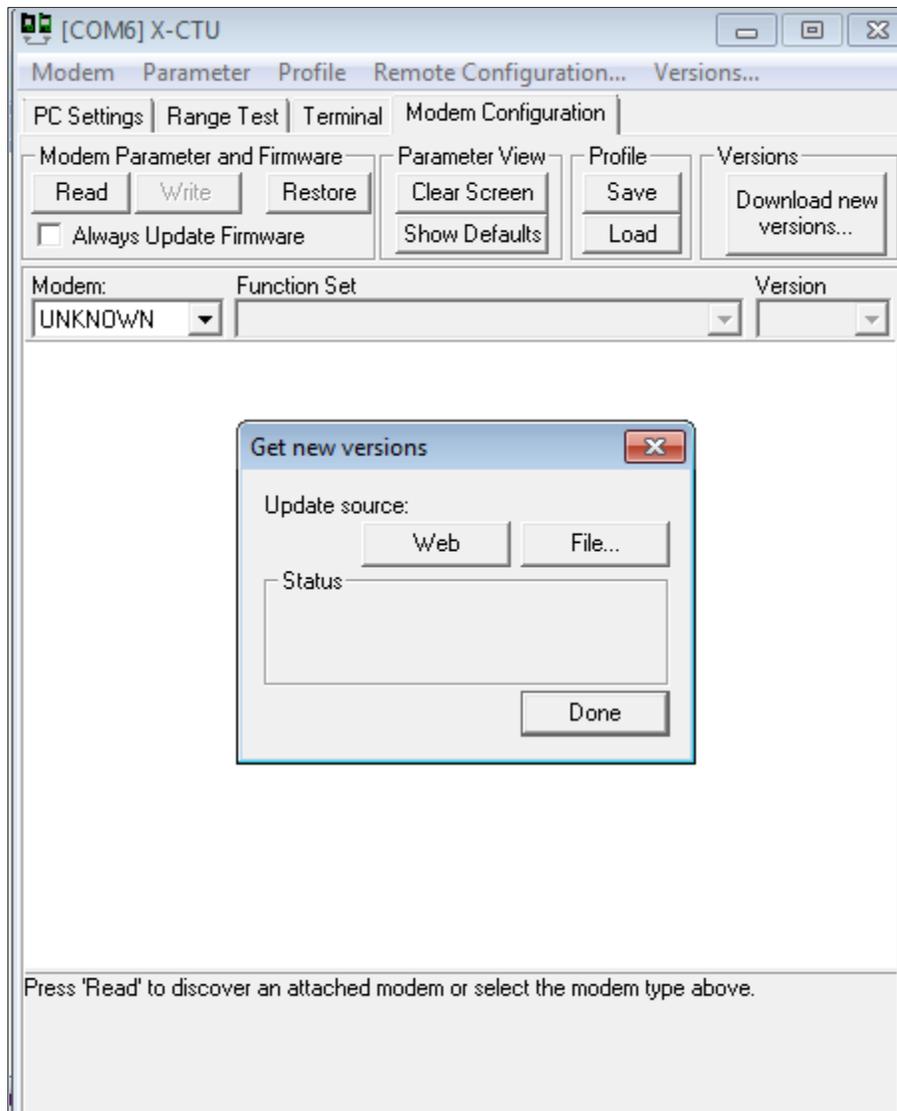


Figura AII.7. Opción de actualización del firmware

En esta misma ventana podemos configurar al modulo XBee, sin la necesidad de conocer los comandos AT. En esta ventana podemos ver todas las configuraciones posibles para el módulo y se puede seleccionar cualquier opción y configurarla. Si queremos leer la configuración del módulo se debe pulsar el botón denominado “Read”, con lo cual el programa reconoce al módulo y muestra los comandos aplicables. En la Figura AII.8, se ve lo que aparece al presionar el botón “Read” (estos valores pueden cambiar, dependiendo del módulo).

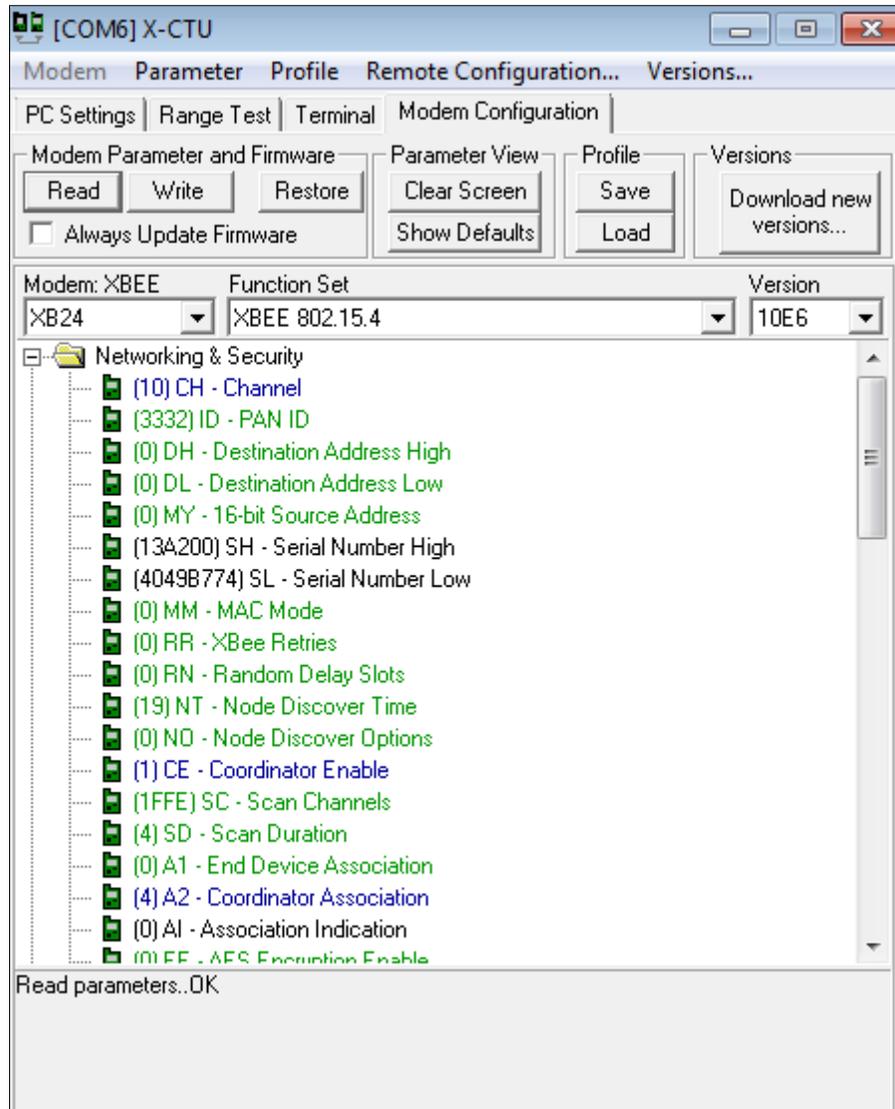


Figura AII.8. Lectura de los parámetros del módulo

Si se desea modificar los parámetros seleccione el comando, y se elige la opción adecuada o se ingresa el valor; en la parte inferior de la pantalla existe una pequeña ayuda, donde muestra información acerca de las opciones de cada comando seleccionado. Una vez realizada la modificación de los parámetros, se debe pulsar el botón denominado “Write”, con lo cual dichas modificaciones se graban en la memoria del módulo.

En la siguiente figura se muestra la ventana en la cual se está cambiando el comando MY asignándole un valor 1234. El comando MY permite leer o establecer la dirección corta de 16 bits del módulo XBee. Después seleccionamos el botón “Write” para guardar las modificaciones en la memoria no volátil del módulo XBee.

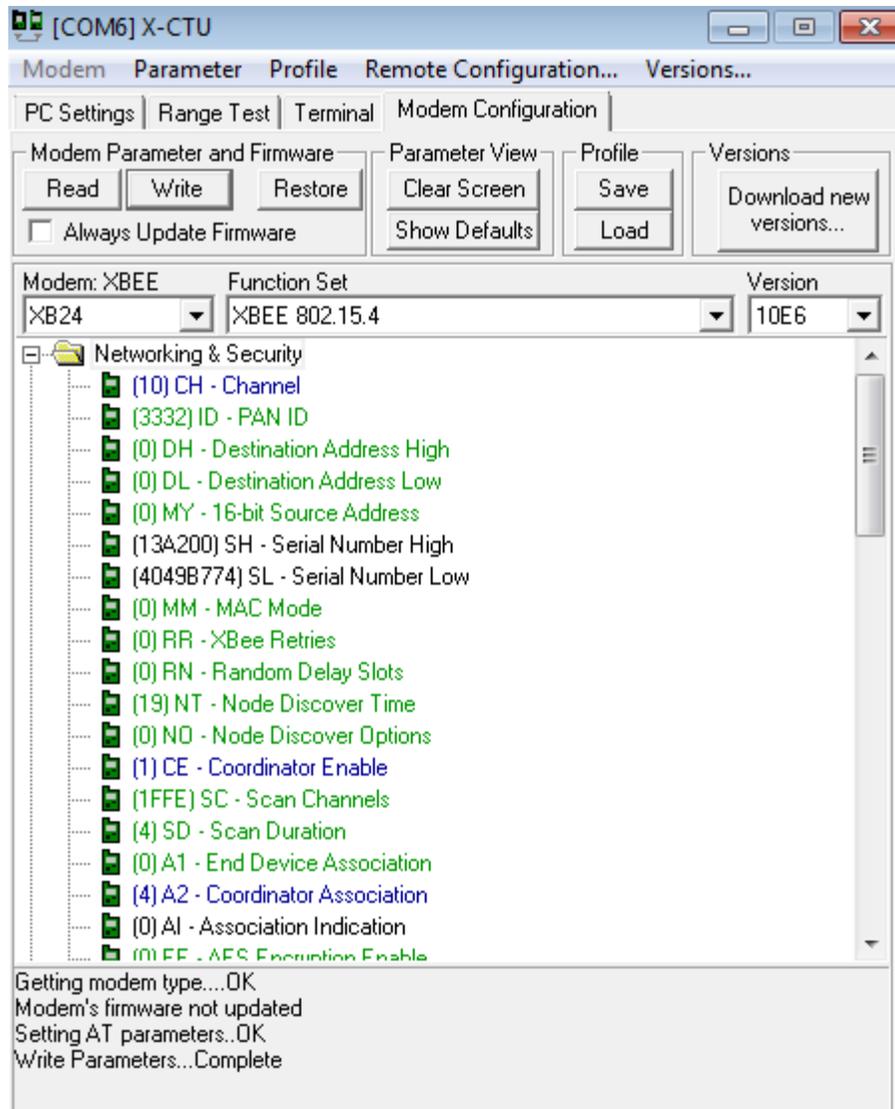


Figura AII.9. Modificación de parámetros del módulo

Como se observa en la figura anterior, en la ventana inferior se muestra el estado de las acciones realizadas. Cuando se realiza algún cambio, este se pone de color azul, como se puede ver en la figura. Si se desea guardar la configuración actual se puede hacer con el botón “Save”.

El botón “Restore”, permite establecer los valores de fabrica del módulo, borrando los parámetros modificados por el usuario.

Anexo III

A continuación se presenta una guía rápida sobre el programa implementado en Visual Basic, así como algunas descripciones del programa:

Debemos tener en cuenta que para poder trabajar con comunicación serial en este programa debemos verificar que esté habilitada la opción “Comm Control 6.0”, la cual podemos encontrar en el cuadro de componentes, como se muestra en la Figura AIII.1.

Para acceder a este cuadro, debemos dar clic derecho a la barra de componentes y elegir la opción “Componentes”. Luego seleccionar el recuadro para activar esta opción, finalmente damos clic en “Aceptar”.

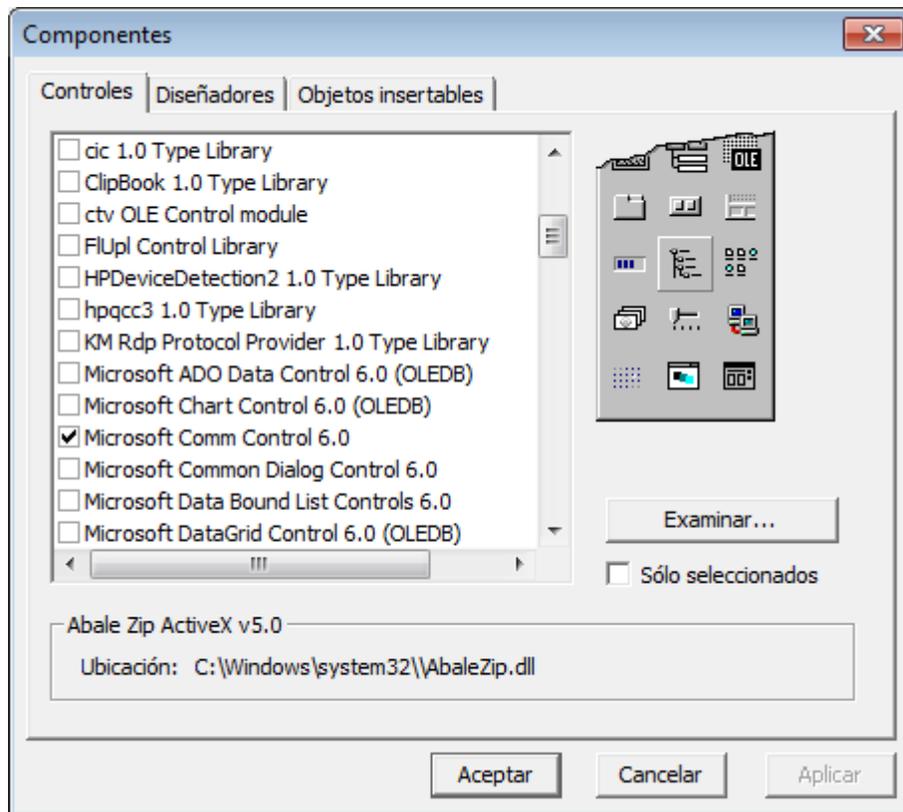


Figura AIII.1. Cuadro de componentes en Visual Basic

En la Figura AIII.2, se puede ver la interfaz utilizada, en la cual está desplegada la lista de puertos que se pueden utilizar; como vemos solo hemos agregado del puerto COM1 al COM6.

Se debe tener en cuenta que el XBee trabaja a 9600 baudios y este programa trabaja a esa tasa de transferencia.

Después de escoger el COM al cual se tiene conectado la placa de recepción de datos se le da clic en el botón CONECTAR, de esta manera se podrá establecer la conexión entre la computadora y la placa de recepción de datos.

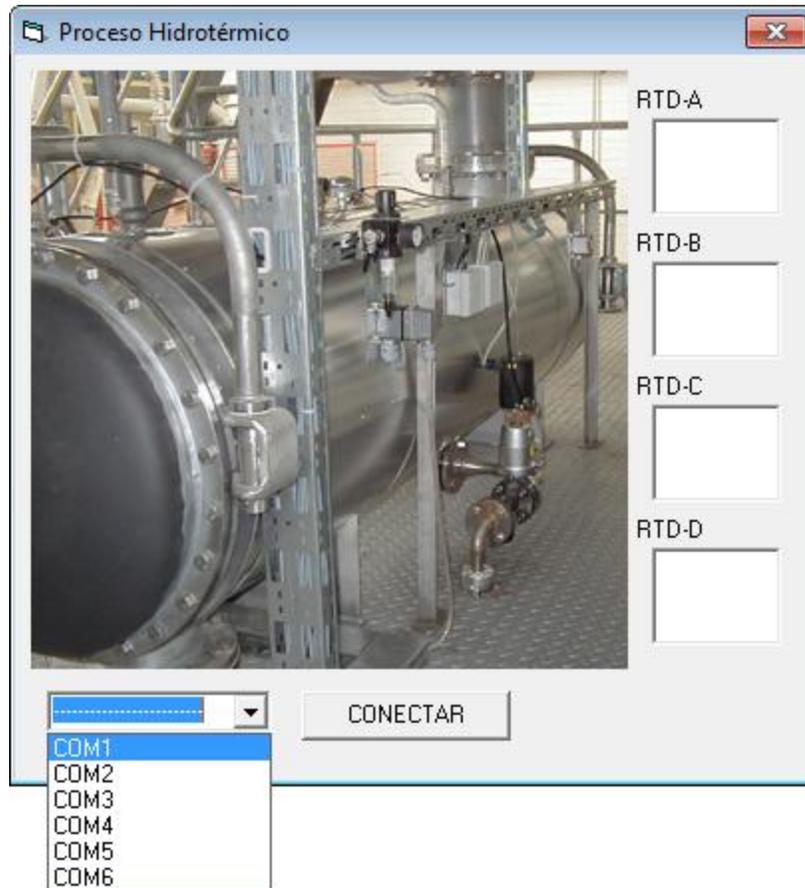


Figura AIII.2. Interfaz utilizada

En la Figura AIII.3, se ve que al dar clic en el botón “CONETAR”, este cambia a “DESCONETAR”; ya cuando se ha realizado la conexión entre la tarjeta de recepción y la computadora por el puerto COM1, se empieza a recibir los datos de temperaturas, los cuales se pueden ver en los cuadros que están bajo los nombre de RTD-A, RTD-B, RTD-C, RTD-D. El rango de temperatura va de 0V a 5V, en un rango de -25°C a 100°C; siendo 0°C = 1V = 2mA (salida de la RTD).



Figura AIII.3. COM1 conectado

Como se puede observar en la Figura AIII.4, al dar clic en el botón “DESCONECTAR”, aparece un recuadro el cual nos pregunta si queremos proseguir con esta acción, o queremos anular la acción anteriormente aplicada.

Si se da clic en el botón “Sí”, entonces se procede a desconectar la comunicación entre la tarjeta de recepción y la computadora por medio del puerto COM seleccionado anteriormente. Y se puede volver a conectar si se desea.

Si se da clic en el botón “No”, entonces el programa obvia la acción de desconectar llamada anteriormente.



Figura AIII.4. Ventana al desconectar

- **Programa implementado:**

A continuación presentamos el código implementado en el programa Visual Basic 6.0, el cual nos ayuda a recibir y mostrar los datos de temperatura transmitidos de forma inalámbrica. Las líneas de código que se encuentran después de un “'” son comentarios, estas no afectan al código implementado.

Dim textin As String	‘Defino variables como cadena
Dim w, x, NumeroRTD As Integer	‘Defino variables como integradores
Dim Lon As Integer	
Dim Codigo As Byte	‘Defino variables como byte
Dim Cadenadato As String	
Dim temp, temp1, temp2, dato As String	
Dim Codigos As String	
Private i%, msgRet%	
Private Sub cmdcon_Click()	‘Código al dar clic en el botón conectar
If cmdcon.Caption = "CONECTAR" Then	‘Comienzo del bucle si, dice conectar
puerto.CommPort = Val(cmbsele.ListIndex + 1)	‘Elige el Puerto que abrirá
puerto.PortOpen = True	‘Establece conexión con el puerto
puerto.InputLen = 20	‘Lee 20 caracteres
Timer1.Enabled = True	‘Activa el timer implementado
cmdcon.Caption = "DESCONECTAR"	‘Cambia conectar por desconectar

Else

If cmdcon.Caption = "DESCONECTAR" Then ‘Comienzo del bucle si, dice desconectar
msgRet = MsgBox("ESTA CERRANDO CESION" & vbCrLf & _
"¿Desea desconectar?", vbQuestion + vbYesNo, "Aviso") ‘Muestra caja de texto
preguntando si desea continuar

If msgRet = vbYes Then ‘Si la respuesta es Si
Timer1.Enabled = False ‘Descativa el timer implementado
puerto.PortOpen = False ‘Cierra la conexión con el puerto
cmdcon.Caption = "CONECTAR" ‘Cambia desconectar por conectar
End If ‘Termina bucle “Si”

Else
If msgRet = vbNo Then ‘Si la respuesta No
End If ‘Termina bucle “Si”

End If ‘Termina bucle “Si”
End If ‘Termina bucle “Si”
End Sub ‘Termina código del botón conectar

Private Sub Timer1_Timer() ‘Código del botón timer

textin = puerto.Input ‘Se guarda en textin, lo que se lee del
puerto

Lon = Len(textin) ‘Se guarda la longitud de textin en Lon

For w = 1 To Lon ‘Bucle desde w=1 hasta Lon

Codigo = Asc(Mid(textin, w, 1)) ‘Se guarda en Codigo un dato de textin
como decimal

Codigos = Codigos & Str(Codigo) ‘Se guarda en Códigos dato a dato de
textin como cadena

If Codigo = 13 Then ‘Comienza bucle Si Codigo igual a 13
(retorno de carro)

Cadenadato = Codigos ‘Se guarda en Cadenadato, lo guardado
hasta ahora en Codigos

Codigos = "" ‘Se limpia la variable Codigos

End If ‘Termina bucle “Si”

Next w ‘Termina la definición del bucle for

If Len(Cadenadato) > 25 Then ‘Comienza bucle Si longitud de
Cadenadato es mayor que 25

NumeroRTD = Val(Mid(Cadenadato, 11, 2)) - 49 ‘Se guarda el número del RTD que
se lee

temp = Mid(Cadenadato, 20, 6) ‘Se guarda en temp los datos de
cadenadato desde el caracter 20 hasta el 25

x = 3 ‘Se le asigna un valor cualquiera a x

Lon = Len(temp) ‘Se guarda en Lon la longitud de temp

For w = 1 To Lon ‘Bucle desde w=1 hasta Lon

Codigo = Asc(Mid(temp, w, 1)) ‘Se guarda en Codigo un dato de textin
como decimal

If Codigo = 32 Then ‘Comienza bucle Si Codigo igual a 32
(espacio)

i = i + 1	‘Se crea un arreglo para saber cuántos
espacios estamos leyendo i = número de espacios	
If i = 2 Then	‘Si se encuentra i=2, osea dos espacios
x = w - 1	‘x = caracter w-1
i = 0	‘Se limpia la variable i
End If	‘Termina bucle “Si”
End If	‘Termina bucle “Si”
Next w	‘Termina la definición del bucle for
temp1 = Mid(temp, 1, 1)	‘Temp1 igual al primer dato de temp
temp2 = Mid(temp, 3, x - 1)	‘Temp2 igual al segundo dato de temp2 a
partir del 3er caracter hasta el ultimo	
dato = CStr(Round((0.1222 * (Val(temp1 * (256)) + Val(temp2)) - 25), 2)) + "°C"	
‘Se halla el valor de temperatura con 2 decimales de aproximación	
Select Case NumeroRTD	‘Selecciona el caso para la RTD que
pertenece	
Case 0	‘Caso para la 1era RTD
RTD(0).Caption = dato	‘Imprime en el recuadro RTDA, dato
Case 1	‘Caso para la 2da RTD
RTD(1).Caption = dato	‘Imprime en el recuadro RTDB, dato
Case 2	‘Caso para la 3era RTD
RTD(2).Caption = dato	‘Imprime en el recuadro RTDC, dato
Case 3	‘Caso para la 4era RTD
RTD(3).Caption = dato	‘Imprime en el recuadro RTDD, dato
End Select	‘Termina la definición del bucle select
End Sub	‘Termina código del boton timer

Anexo IV

A continuación presentamos el código compilado por MPLAB X, para el desarrollo de nuestra aplicación específica del proceso de transmisión de datos.

Las líneas de código que se encuentren después de “//”, representan comentarios al código implementado para un mejor entendimiento. Cabe aclarar que el comentario y el símbolo “//” utilizado no afecta al código del programa.

```
/*
 * Oscilador: 4MHz
 */

//-----
//Defino opciones de grabación
//-----

#include <xc.h>                                //librería del PIC

__CONFIG(FOSC_XT & WDTE_OFF & PWRTE_OFF & BOREN_ON & LVP_OFF
& CPD_OFF & WRT_OFF & CP_OFF);              //palabra de configuración para grabar el
PIC

#define _XTAL_FREQ 4000000                    //define la frecuencia para los delays

//-----
//Defino sub-programas utilizados
//-----

void CONFIGURAR_PINES(void);                 //sub programa para configurar pines del PIC
void CONFIGURAR_USART(void);                 //sub programa para configurar el USART

//-----
//Defino caracteres para el envío de datos
//-----

unsigned char Msg1[7] = {"POT1: "};          //Declaro caracteres para el primer RTD
unsigned char Msg2[7] = {"POT2: "};          //Declaro caracteres para el segundo RTD
unsigned char Msg3[7] = {"POT3: "};          //Declaro caracteres para el tercer RTD
unsigned char Msg4[7] = {"POT4: "};          //Declaro caracteres para el cuarto RTD
```

```

//-----
//Programa principal
//-----

void main(void)                //Comienza el programa principal

{unsigned char i;              //Declaro caracter para el primer RTD

CONFIGURAR_PINES();           //llamo al sub programa conf. pines
CONFIGURAR_USART();           //llamo al sub programa conf. usart

ADCON0 = 0B01000001;          //preparo el ACON0 para la conversión A/D

//-----
//Programa principal – conversión A/D
//-----

    while(1)

    {

ADCON0bits.CHS1 = 0;
ADCON0bits.CHS0 = 0;          // Defino el canal utilizado: ADO
    __delay_us(200);          //retraso de 200us
ADCON0bits.GO_DONE = 1;      //iniciar la conversión
while(ADCON0bits.GO_DONE ==1); //esperar que termine la conversión
for(i=0;i<6;i++)             //Arreglo para enviar caracteres del primer RTD
{
    TXREG = Msg1[i];
    while(TXSTAbits.TRMT == 0);
}
TXREG = ADRESH;              //envía la información por el UART
while(TXSTAbits.TRMT == 0);  //se realiza la acción anterior hasta que acabe
TXREG = ADRESL;              //envía la información por el UART
while(TXSTAbits.TRMT == 0);  //se realiza la acción anterior hasta que acabe
TXREG = 10;                  //realiza un salto de línea
while(TXSTAbits.TRMT == 0);  //se realiza la acción anterior hasta que acabe
TXREG = 13;                  //regreso de carro de escritura
while(TXSTAbits.TRMT == 0);  //se realiza la acción anterior hasta que acabe
    __delay_ms(500);          //retraso de 500ms

ADCON0bits.CHS1 = 0;
ADCON0bits.CHS0 = 1;          //Defino el canal utilizado: canal AD1
    __delay_us(200);          //retraso de 200us
ADCON0bits.GO_DONE = 1;      //inicia la conversión
while(ADCON0bits.GO_DONE ==1); //espera que termine la conversión
for(i=0;i<6;i++)             //Arreglo para enviar caracteres del segundo RTD
{

```

```

    TXREG = Msg2[i];
    while(TXSTAbits.TRMT == 0);
}
TXREG = ADRESH; //envía la información por el UART
while(TXSTAbits.TRMT == 0); //se realiza la acción anterior hasta que acabe
TXREG = ADRESL; //envía la información por el UART
while(TXSTAbits.TRMT == 0); //se realiza la acción anterior hasta que acabe
TXREG = 10; //realiza un salto de línea
while(TXSTAbits.TRMT == 0); //se realiza la acción anterior hasta que acabe
TXREG = 13; //regreso de carro de escritura
while(TXSTAbits.TRMT == 0); //se realiza la acción anterior hasta que acabe
__delay_ms(500); //retraso de 500ms

ADCON0bits.CHS1 = 1;
ADCON0bits.CHS0 = 0; //Defino el canal utilizado: canal AD2
__delay_us(200); //retraso de 200us
ADCON0bits.GO_DONE = 1; //inicia la conversión
while(ADCON0bits.GO_DONE ==1); //espera que termine la conversión
for(i=0;i<6;i++) //Arreglo para enviar caracteres del tercer RTD
{
    TXREG = Msg3[i];
    while(TXSTAbits.TRMT == 0);
}
TXREG = ADRESH; //envía la información por el UART
while(TXSTAbits.TRMT == 0); //se realiza la acción anterior hasta que acabe
TXREG = ADRESL; //envía la información por el UART
while(TXSTAbits.TRMT == 0); //se realiza la acción anterior hasta que acabe
TXREG = 10; //realiza un salto de línea
while(TXSTAbits.TRMT == 0); //se realiza la acción anterior hasta que acabe
TXREG = 13; //regreso de carro de escritura
while(TXSTAbits.TRMT == 0); //se realiza la acción anterior hasta que acabe
__delay_ms(500); //retraso de 500ms

ADCON0bits.CHS1 = 1;
ADCON0bits.CHS0 = 1; //Defino el canal utilizado: canal AD3
__delay_us(200); //retraso de 200us
ADCON0bits.GO_DONE = 1; //inicia la conversión
while(ADCON0bits.GO_DONE ==1); //espera que termine la conversión
for(i=0;i<6;i++) //Arreglo para enviar caracteres del cuarto RTD
{
    TXREG = Msg4[i];
    while(TXSTAbits.TRMT == 0);
}
TXREG = ADRESH; //envía la información por el UART
while(TXSTAbits.TRMT == 0); //se realiza la acción anterior hasta que acabe
TXREG = ADRESL; //envía la información por el UART
while(TXSTAbits.TRMT == 0); //se realiza la acción anterior hasta que acabe
TXREG = 10; //realiza un salto de línea
while(TXSTAbits.TRMT == 0); //se realiza la acción anterior hasta que acabe

```

```

TXREG = 13; //regreso de carro de escritura
while(TXSTAbits.TRMT == 0); //se realiza la acción anterior hasta que acabe
__delay_ms(500); //retraso de 500ms

}

}

//-----
//Sub programa para configuración de pines
//-----

void CONFIGURAR_PINES(void) //comienza sub-programa

{

PORTA = 0; //limpia los puertos A, B y C
PORTB = 0;
PORTC = 0;
ADCON1 = 0B10000010; //RA0 - RA4 como entradas Analógicas
TRISA = 0B00111111; //RA0 - RA5 sean entradas en el puerto A
TRISB = 255; //configuración como entradas el puerto B
TRISC = 0B10111111; //Rx como entrada y Tx como salida puerto C

}

//-----
//Sub programa para la comunicación serial
//-----

void CONFIGURAR_USART(void) //comienzo de sub-programa

{

TXSTA = 0B00100100; //programa el TX de la comunicación serial
RCSTA = 0B10010000; //programa el RX de la comunicación serial
SPBRG = 25; //baut rate register

}

```

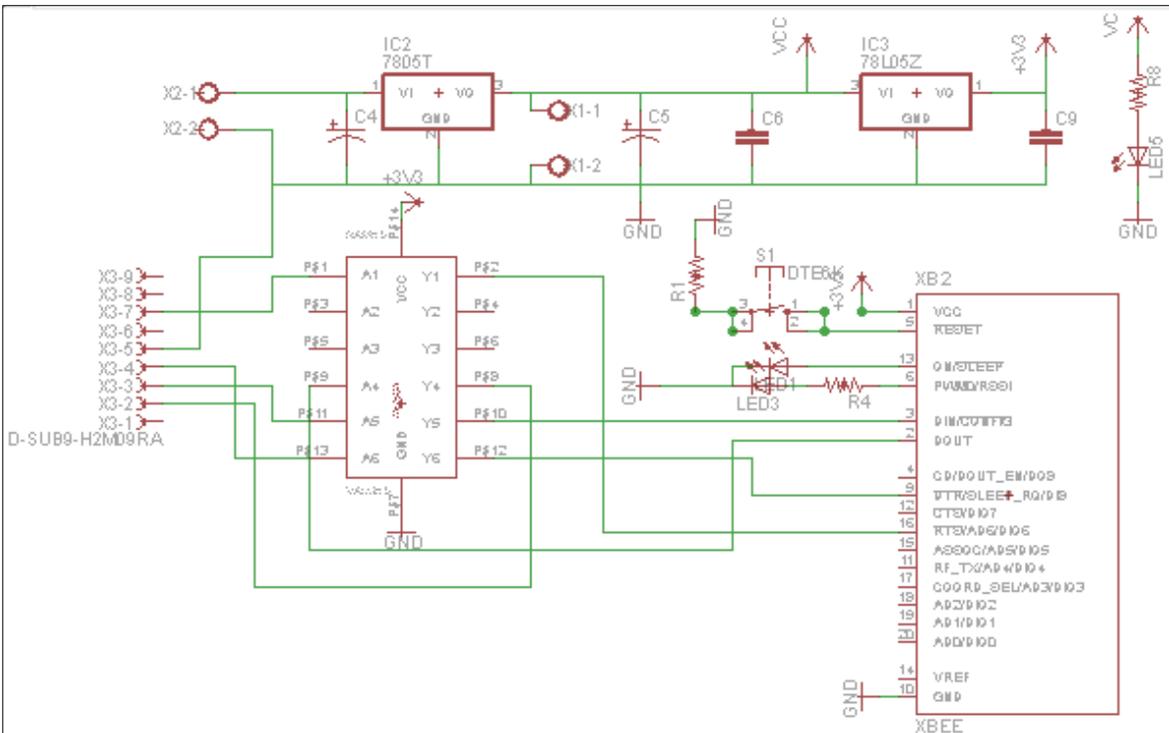



Figura AV.3. Esquemático de la tarjeta de recepción inalámbrica

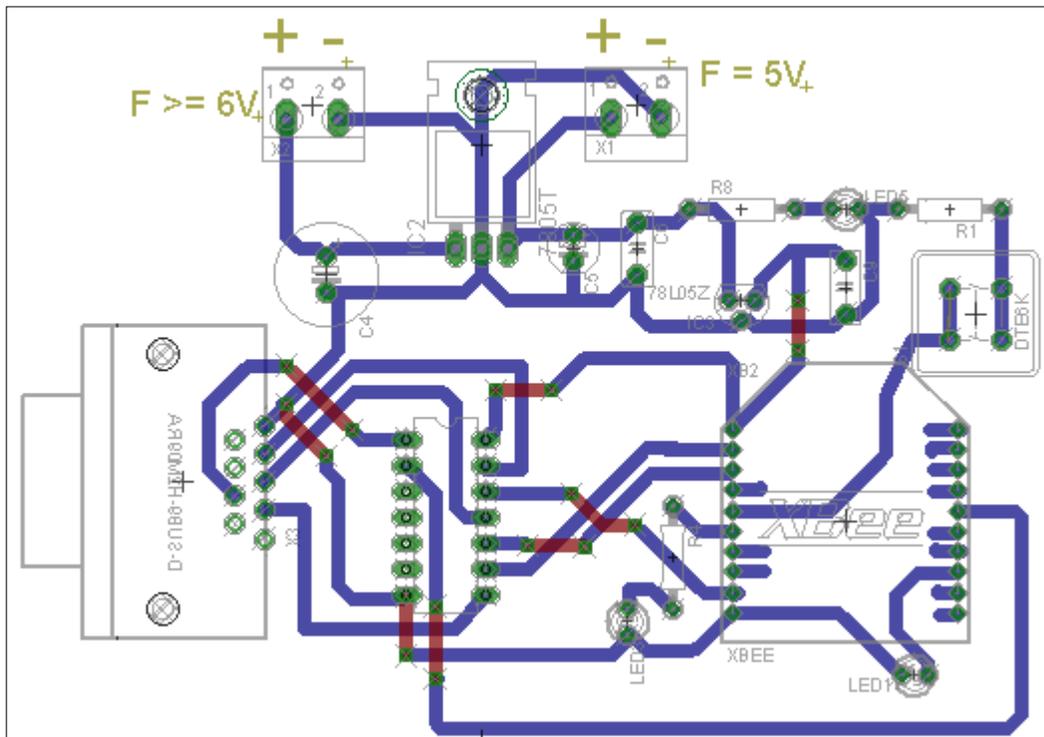


Figura AV.4. Circuito impreso de la tarjeta de recepción inalámbrica.

Anexo VI

Se presenta a continuación las pruebas realizadas:

- **Verificación de comunicación:**

Esta prueba se realiza para verificar el reconocimiento del módulo XBee de la tarjeta de recepción de datos conectada a la PC; así como la configuración de los módulos XBee con los que se trabaja.

En la Foto AVI.1, se muestra la conexión que se realizó entre la PC y la tarjeta de recepción de datos por medio del cable USB-SERIAL (HL-340). Y en la Figura AVI.1, se muestra la información del módulo reconocido por la PC.



Foto AVI.1. Conexión para probar la comunicación entre PC y tarjeta de recepción.

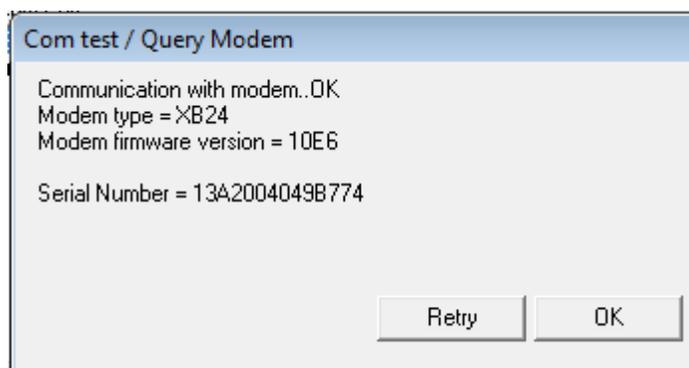


Figura AVI.1. Respuesta de la PC, para prueba del módulo utilizado.

- **Pruebas de comunicación y alcance de los módulos:**

Esta prueba consiste en probar la comunicación entre dos tarjetas de recepción de datos, conectadas a computadoras portátiles distintas, luego enviar y recibir datos para verificar el buen funcionamiento de las tarjetas de recepción. Con esto se puede verificar la tasa de error de transmisión de datos entre los módulos.

En esta prueba se procedió a enviar datos de una computadora a otra, el transmisor envía una trama de 64 caracteres a 9600 baudios, el receptor los recibe, luego se hace una comparación entre los datos enviados y los recibidos, hallándose una tasa de error.

Tabla AVI.1. Datos de prueba de alcance en interiores

Lugar	Distancia[m]	Tasa de error [%]
Interior	10	0
Interior	20	0
Interior	30	0
Interior	35	9.375

En la Figura AVI.2, se aprecia la terminal del programa X-CTU, el mensaje enviado esta en azul y el recibido en rojo a 30m en interiores.

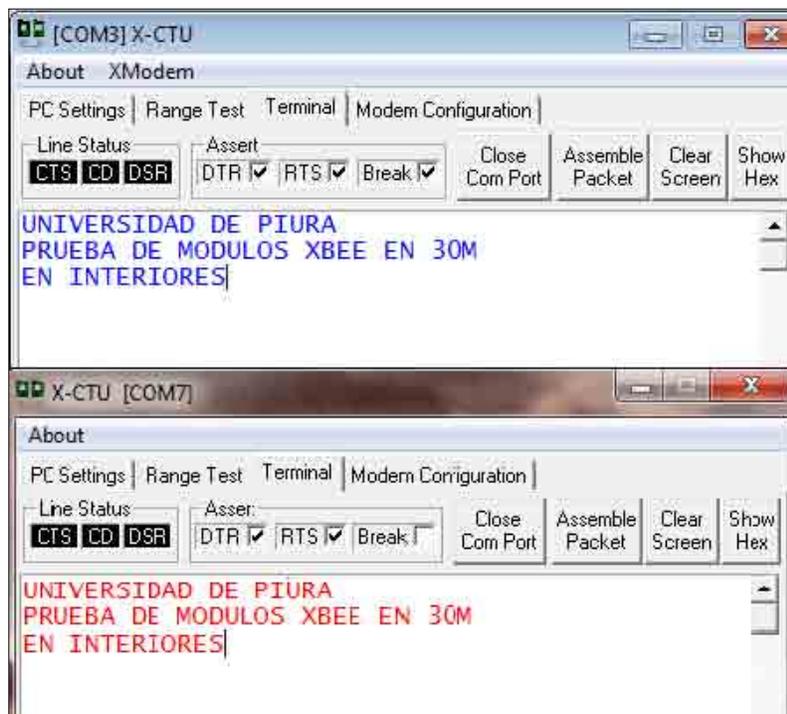


Figura VI.2. Terminal del X-CTU en prueba de comunicación a 30m

Luego, la prueba de alcance que se realizo en exteriores, se realizo a una velocidad de 9600 baudios, para esto se uso una tarjeta de transmisión y una recepción; teniendo en cuenta que la tarjeta de transmisión se puenteo el TX con el RX (loop back). La tarjeta de recepción de datos se conecto a una PC portátil y se ejecuto el programa X-CTU en la opción “Range test” (prueba de alcance). La trama enviada constaba de 32 caracteres que fueron: 0123456789;.<=>?@ABCDEFGHIJKLMNO; esta trama se envió 20 veces.

Tabla AVI.1. Datos de prueba de alcance en exteriores

Lugar 1	Distancia	Tasa de error [%]
Interior	10m	0
Exterior	30m	0
Exterior	50m	0
Exterior	90m	0
Exterior	100m	0
Exterior	110m	15

En la Figura AVI.3, se puede apreciar la prueba de alcance realizada a 100 metros, la cual tiene un porcentaje de error 0. Además en la Figura AVI.4, se muestra la prueba de alcance a 110 metros, la cual tiene un porcentaje de error de 15. Con estas pruebas se puede comprobar que el alcance máximo real es igual al teórico.

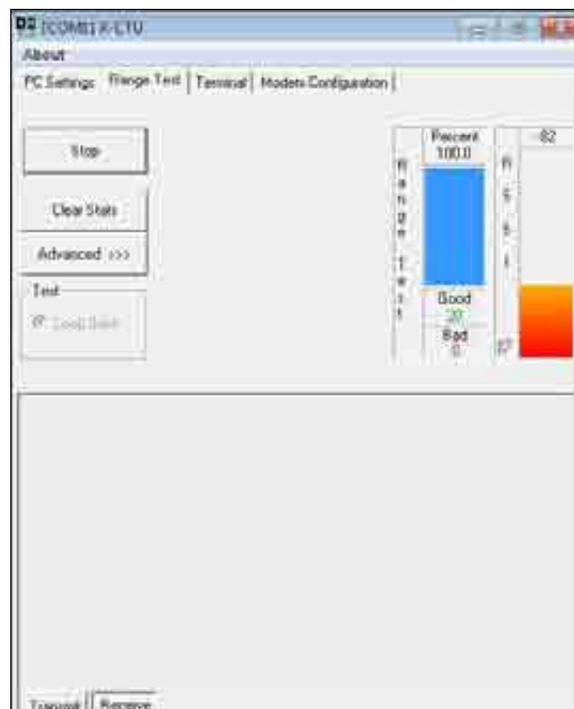


Figura AVI.3. Terminal del X-CTU en prueba de comunicación a 100m

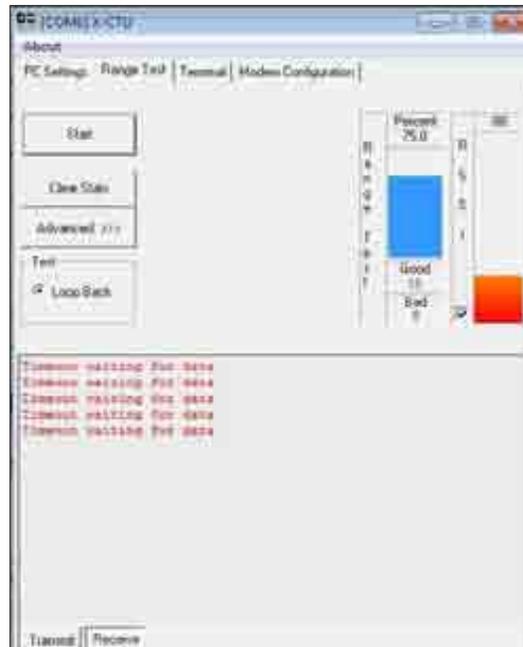


Figura AVI.4. Terminal del X-CTU en prueba de comunicación a 110m

- **Prueba de transmisión de temperaturas:**

En esta prueba se probó el programa implementado en Visual Basic 6.0., los resultados obtenidos fueron estos:

En la Figura AVI.5, se puede apreciar las temperaturas en el programa utilizado hecho en Visual Basic, con los potenciómetros que reemplazan los sensores resistivos (RTD). Las entradas al microcontrolador son de 0 a 5V, los cuales son equivalentes a un rango de -25°C a 100°C respectivamente.



Figura AVI.5. Temperatura en Visual Basic en prueba de comunicación