



**Máster en Redes de Telecomunicación para  
Países en Desarrollo**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA  
DE TELECOMUNICACIÓN**

**PROYECTO DE FIN DE MÁSTER**

***DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED  
INALÁMBRICA, APLICANDO EL ESTÁNDAR DE  
COMUNICACIONES ZIGBEE, PARA EL MONITOREO DE  
LOS SISTEMAS: ANTIHELADAS, REGADÍO Y  
VENTILACIÓN DE UN PROTOTIPO DE INVERNADERO  
INTELIGENTE PARA EL CULTIVO DE ROSAS***

**Autor: Mayra Johanna Erazo Rodas**

**Tutor: Juan Antonio Hernández Tamames PhD.**

**Co-tutor: Susana Borromeo López PhD.**

**Curso académico: 2011 / 2012**



## ACTA DE EVALUACIÓN

**Alumna:** Mayra Johanna Erazo Rodas.

**Titulación:** Máster en Redes de Telecomunicaciones para Países en Desarrollo.

**Título del Proyecto:** Diseño e implementación de una red inalámbrica, aplicando el estándar de comunicaciones ZIGBEE, para el monitoreo de los sistemas: antiheladas, regadío y ventilación de un prototipo de invernadero inteligente para el cultivo de rosas.

**Tutor:** Juan Antonio Hernández Tamames PhD.

**Co-tutor:** Susana Borromeo López PhD.

### TRIBUNAL

**Presidente:**

**Vocal:**

**Secretario:**

### CALIFICACIÓN DETALLADA DEL PROYECTO

	Presidente	Vocal	Secretario
<b>Presentación escrita</b> (MB-B-R-M-MM)			
<b>Presentación oral</b> (MB-B-R-M-MM)			
<b>Complejidad técnica</b> (MB-B-R-M-MM)			
<b>Metodología empleada</b> (MB-B-R-M-MM)			
<b>Resultados obtenidos</b> (MB-B-R-M-MM)			
<b>Esfuerzo realizado</b> (MB-B-R-M-MM)			

### CALIFICACIÓN FINAL DEL PROYECTO

(Nota numérica)	SB / NOT / AP / SS / NP Enmarcar la calificación alcanzada
-----------------	---

Fuenlabrada, 16 de Julio de 2012.

El Presidente

El Vocal

El Secretario



## **Agradecimientos**

*Agradezco a Dios por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el período de estudio, quienes en mi estadía en España día a día a la distancia me acompañaron incondicionalmente con sus oraciones y frases de cariño, y a quienes tuve presente en la ejecución de cada uno de los retos y nuevas experiencias duras que tuve que pasar lejos de mi país. Y que decir de toda la fuerza que me han aportado en estos últimos días en los que todo ha sido tensiones y preocupaciones para concluir esta etapa final del proyecto, por ustedes soy lo que soy y para ustedes va dedicado este trabajo.*

*A mis padres:*

*Narcisa Rodas y Mario Erazo, que son mi razón de vivir, a quienes de todo corazón agradezco su amor, cariño y comprensión. Ustedes han sido el pilar fundamental en todas las etapas de mi vida y me han dado la fuerza que me ayuda a seguir adelante, por su sacrificio durante todo este tiempo para poder alcanzar este sueño, gracias. Son los mejores padres del mundo.*

*A mis hermanos:*

*Lorena y Mario porque juntos aprendimos a vivir, por haber confiado en mí y ser mis mejores amigos y confidentes. De ustedes he aprendido tantas cosas que me han ayudado a ser una mejor persona. Nadie mejor que ustedes para conocerme y comprenderme. Les quiero mucho.*

*A mi abuelita: Hilda Laverde quien con su ejemplo me ha enseñado a rebasar todas las barreras que la vida nos presenta. Agradeceré hoy y siempre a mis tíos y primos por brindarme la fortaleza necesaria para seguir adelante. Al concluir una etapa tan importante en mi vida, me doy cuenta que no he llegado sola, porque ustedes están siempre conmigo.*

*Un agradecimiento muy especial a Javier y Juan Antonio, quienes me han brindado un apoyo incondicional, colaborando en todo momento con su orientación.*

*A mis abuelitos: Leonidas Erazo, Miguel Ángel Rodas y Blanca Calderón, quienes vivirán por siempre en mi corazón.*



## Resumen

La producción de flores es una de las actividades más importantes que sustenta la economía del Ecuador, siendo la rosa una de las especies más cotizadas a nivel mundial. Sin embargo en la actualidad existe muy poca investigación orientada al monitoreo de los sistemas de ventilación, riego y anti-heladas, que contribuyan al mejoramiento de la producción del cultivo.

En el presente trabajo se ha diseñado e implementado una red inalámbrica aplicando el estándar de comunicaciones ZIGBEE, dedicada al monitoreo de las variables físicas de: temperatura, humedad relativa, humedad del suelo, concentración de CO<sub>2</sub> y luminosidad, que permitan optimizar el manejo de invernaderos, permitiendo la toma de acciones correctivas oportunas.

Se ha desarrollado una red conformada por tres nodos sensores encargados de recolectar datos de cada uno de los sensores distribuidos en el interior de un prototipo de invernadero ubicado en las instalaciones de la Escuela Politécnica del Ejército Extensión Latacunga – Ecuador.

Cada nodo sensor está conformado por un microcontrolador y un módulo de comunicación inalámbrica ZIGBEE. El microcontrolador se encarga de digitalizar las señales provenientes de cada sensor, procesar los datos y enviarlos a través del puerto UART al módulo ZIGBEE. Además llevan incorporada una batería de 12Vcd, para la alimentación de cada uno de los componentes del nodo.

Otro elemento integrante de la red es un nodo coordinador encargado de gestionar la comunicación con los nodos sensores. Este nodo está integrado por un microcontrolador y un módulo ZIGBEE. El módulo ZIGBEE se encarga de comunicarse directamente con cada nodo sensor. El microcontrolador recibe datos enviados por el módulo RF a través del puerto UART, los procesa y envía por medio del puerto USB al computador destinado para el manejo de la interfaz HMI. El nodo coordinador fue configurado como un dispositivo USB con transferencia de datos tipo BULK.

La interfaz HMI se desarrollo en LABVIEW. Para enlazar el puerto USB del microcontrolador con LABVIEW, se manejo librerías dinámica DLL de MICROCHIP que permiten la creación de enlaces virtuales “pipes”.

La pantalla principal de la interfaz HMI diseñada realiza el monitoreo en cuatro secciones bien definidas que son: monitoreo del canal virtual USB, monitoreo del estado de la batería, monitoreo de las cinco variables del invernadero y panel de alarmas en caso de exceder los valores óptimos de alguna de las variables. A fin de que el operador del sistema adopte las acciones correctivas inmediatas.



# Índice general

<b>I. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Introducción.....	2
1.2 Descripción del problema.....	2
1.3 Análisis de alternativas.....	3
1.4 Objetivos.....	4
1.4.1 Objetivo general.....	4
1.4.2 Objetivo específico.....	4
1.5 Descripción del sistema.....	4
<b>II. Invernadero</b>	<b>8</b>
2.1 Definición.....	9
2.2 Invernadero inteligente.....	9
2.3 Sistemas de monitoreo del invernadero.....	11
2.3.1 Sistema de riego.....	11
2.3.2 Sistema de ventilación.....	13
2.3.3 Sistema antilehada.....	13
2.4 Análisis de las variables físicas a monitorear.....	14
<b>III. Subsistema de sensado</b>	<b>15</b>
3.1 Sensor de temperatura.....	16
3.2 Acondicionamiento de la señal de temperatura.....	16
3.3 Sensor de humedad relativa.....	18
3.4 Acondicionamiento de la señal de humedad relativa.....	19
3.5 Sensor de concentración de CO <sub>2</sub> .....	20
3.6 Acondicionamiento de la señal de concentración de CO <sub>2</sub> .....	22
3.7 Sensor de luminosidad.....	23
3.8 Acondicionamiento de la señal de luminosidad.....	24
3.9 Sensor de humedad del suelo.....	25
3.10 Acondicionamiento de la señal de la señal de humedad del suelo.....	28
3.11 Baterías de los nodos sensores.....	29
3.12 Selección del microcontrolador de los nodos sensores.....	30
3.13 Diagramas de conexión del PIC6F88.....	32
3.14 Comunicación vía UART – USART.....	34
3.15 Programación del microcontrolador de los nodos sensores.....	35

<b>IV. Estándar de comunicaciones ZIGBEE 802.15.4</b>	<b>38</b>
4.1 Generalidades.....	39
4.2 Tipos de dispositivos.....	40
4.3 Arquitectura.....	41
4.3.1 Capa física PHY.....	42
4.3.2 Capa de acceso al medio MAC.....	43
4.3.3 Capa de red NWK.....	44
4.3.4 Capa de aplicación APL.....	45
4.4 Canalización.....	45
4.5 Formación de la red ZIGBEE.....	47
4.6 Consumo de energía.....	47
<b>V. Subsistema de comunicación remota</b>	<b>49</b>
5.1 Elementos de un nodo ZIGBEE.....	50
5.2 Módulo ZIGBEE XBEE DIGIMESH 2.4 RF.....	51
5.3 Configuración de los módulos XBEE DIGIMESH 2.4 RF.....	53
5.3.1 Modos de configuración.....	53
5.3.2 Proceso de configuración.....	56
5.4 Diagramas de conexión de los módulos XBEE.....	64
5.5 Selección del microcontrolador del nodo coordinador.....	66
5.6 Diagrama de conexión del PIC18F2550.....	67
5.7 Comunicación vía USB.....	69
5.7.1 Generalidades.....	69
5.7.2 Modos de transferencia de datos.....	71
5.7.3 Enlaces virtuales (PIPES).....	76
5.8 Configuración del nodo coordinador como dispositivo USB BULK.....	77
5.9 Programación del microcontrolador del nodo coordinador.....	80
<b>VI. Diseño de la Interfaz HMI</b>	<b>83</b>
6.1 Generalidades.....	84
6.2 Librería dinámica MPUSBAPI.DLL de MICROCHIP.....	85
6.3 Enlace de las funciones de MPUSBAPI.DLL a LabVIEW.....	88
6.4 Desarrollo de la interfaz HMI en LabVIEW.....	92
<b>VII. Puesta en marcha del sistema</b>	<b>99</b>
<b>VIII. Conclusiones</b>	<b>105</b>
8.1 Conclusiones.....	106
8.2 Trabajos futuros.....	107

## Índice de figuras

1.1	Mapa geográfico del Ecuador. Principales zonas de producción florícola.....	3
1.2	Diagrama de bloques del proyecto.....	6
2.1	Vista exterior del invernadero implementado en ESPE LATACUNGA.....	9
2.2	Sistema de control del invernadero inteligente.....	10
2.3	Riego por goteo.....	12
2.4	Riego foliar (Antihelada).....	12
2.5	Ventana lateral del invernadero (Sistema de ventilación).....	13
3.1	Aspecto físico del sensor LM35.....	16
3.2	Circuito de acondicionamiento del sensor LM35.....	17
3.3	Curva característica del sensado de temperatura.....	17
3.4	Aspecto físico del sensor – transmisor DWYER 657-1.....	18
3.5	Diagrama del conexionado del transmisor DWYER 657-1.....	18
3.6	Circuito de acondicionamiento del sensor de humedad relativa.....	19
3.7	Curva característica del sensado de humedad relativa.....	20
3.8	Sensor de CO2 AIR SENSE modelo 301E.....	20
3.9	Esquema de la localización de componentes de AIR SENSE modelo 310E.....	22
3.10	Circuito de acondicionamiento del sensor de CO2 AIR SENSE 310E.....	23
3.11	Curva característica del sensado de concentración de CO2.....	23
3.12	Aspecto físico de una fotorresistencia.....	23
3.13	Circuito de acondicionamiento del sensor de luminosidad LDR.....	24
3.14	Curva característica del sensado de luminosidad.....	25
3.15	Sensor de humedad del suelo WATERMARK W5SS.....	25
3.16	Instalación del sensor de humedad del suelo WATERMARK W5SS.....	27
3.17	Instalación de dos sensores de humedad a distinta profundidad.....	27
3.18	Circuito de acondicionamiento del sensor de humedad del suelo.....	28
3.19	Curva característica del sensado de humedad del suelo.....	28
3.20	Batería de 12Vcd FIRST POWER FP1212.....	29
3.21	Diagrama de conexionado del PIC16F88 que forma parte del nodo sensor.....	33
3.22	Diagrama de flujo del programa principal del nodo sensor.....	36
3.23	Diagrama de flujo de la sub-rutina de interrupción del nodo sensor.....	37
4.1	Arquitectura ZIGBEE.....	41
4.2	Stack ZIGBEE.....	42
4.3	Topología de red ZIGBEE.....	44
4.4	Estructura de canales. Estándar IEEE 802.15.4.....	46
4.5	Canalización de la banda 2.4GHz.....	46
5.1	Diagrama de bloques de un nodo ZIGBEE.....	50
5.2	Aspecto físico de los NODOS ZIGBEE implementados en el sistema.....	51
5.3	Módulo ZIGBEE XBEE DIGI-MESH 2.4 RF.....	51
5.4	Circuito básico de funcionamiento del XBEE.....	52

5.5	Flujo interno de datos del módulo XBEE.....	55
5.6	Conexión del convertidor MAX232.....	56
5.7	Configuración HyperTerminal. Descripción de la conexión.....	57
5.8	Configuración HyperTerminal. Selección del puerto.....	57
5.9	Configuración HyperTerminal. Configuración del puerto.....	58
5.10	Configuración HyperTerminal. ASCII.....	58
5.11	Verificación de direcciones SH y SL (Seriales).....	62
5.12	Configuración del canal de comunicación.....	62
5.13	Configuración del identificador de red PAN ID.....	62
5.14	Configuración de la velocidad de transmisión BD.....	63
5.15	Configuración del nombre del nodo NI.....	63
5.16	Configuración del rango de potencia de transmisión PL.....	63
5.17	Configuración de la direcciones de destino.....	64
5.18	Conexión del módulo ZIGBEE para los nodos sensores.....	65
5.19	Conexión del módulo ZIGBEE para el nodo coordinador.....	65
5.20	Diagrama de conexión del PIC8F2550 del nodo coordinador.....	68
5.21	Tipos de conectores USB.....	70
5.22	Conexión USB.....	70
5.23	Drivers controlador del dispositivo USB de MICROCHIP.....	78
5.24	Archivo de configuración del controlador USB del nodo coordinador.....	78
5.25	Actualización del controlador del nodo coordinador.....	79
5.26	Datos del nodo coordinador como dispositivo USB.....	79
5.27	Detalles del nodo coordinador como dispositivo USB.....	80
5.28	Diagrama de flujo del programa principal del nodo coordinador.....	81
5.29	Diagrama de flujo de la subrutina de interrupción del nodo coordinador.....	82
6.1	Pantalla de acceso a las funciones de la librería MPUSBAPI.DLL.....	89
6.2	Pantalla de configuración de los atributos de entrada y salida de la función.....	89
6.3	Icono de la función MPUSBWrite.....	90
6.4	Icono de la función MPUSBGetDeviceCount.....	90
6.5	Icono de la función MPUSBOpen.....	91
6.6	Icono de la función MPUSBRead.....	91
6.7	Icono de la función MPUSBClose.....	92
6.8	Panel frontal de la pantalla de inicio de la interfaz HMI.....	92
6.9	Diagrama de bloques de la pantalla de inicio (Acceso permitido).....	92
6.10	Diagrama de bloques de la pantalla de inicio (Acceso denegado).....	93
6.11	Panel frontal de la pantalla de monitoreo de la interfaz HMI.....	94
6.12	Apertura de pipes para lectura y para escritura.....	96
6.13	Programación de la secuencia de escritura.....	96
6.14	Programación de la secuencia de lectura de datos.....	97
6.15	Programación del SUBVI de tratamiento de datos leídos.....	98
6.16	Programación de la secuencia de cierre de pipes.....	98
7.1	Vista exterior del prototipo de invernadero desarrollado.....	100
7.2	Preparación del terreno.....	100
7.3	Construcción de las camas.....	101
7.4	Instalación del riego por goteo.....	101
7.5	Siembra de rosas.....	101
7.6	Ubicación de los sensores.....	102
7.7	Nodos sensores implementados.....	102

7.8	Nodo coordinador (Dispositivo USB BULK) implementado.....	103
7.9	Baterías de los nodos sensores.....	103
7.10	Puesta en marcha del sistema de monitoreo (Pantalla principal).....	103
7.11	Puesta en marcha del sistema de monitoreo (Visualización de datos).....	104

## Índice de tablas

2.1	Resumen de variables físicas del sistema.....	14
2.2	Análisis de las variables físicas.....	14
3.1	Especificaciones técnicas del sensor LM35.....	16
3.2	Características técnicas DWYER 657-1.....	18
3.3	Características técnicas AIRSENSE 30E.....	21
3.4	Características técnicas de una fotorresistencia.....	24
3.5	Características técnicas WATERMARK W5SS.....	26
3.6	Interpretación de la humedad del suelo.....	26
3.7	Características técnicas batería FP1212.....	30
3.8	Descripción de las funciones de los pines del PIC6F88.....	34
4.1	Principales características del estándar 802.5.4.....	39
4.2	Frecuencia central de canal.....	46
5.1	Características técnicas módulo XBEE DIGI – MEAH 2.4 RF.....	52
5.2	Comandos AT de configuración y gestión de nodos.....	59
5.3	Canales de frecuencia y su comando AT.....	60
5.4	Rangos de potencia de transmisión configurables.....	60
5.5	Valores de velocidad de transmisión configurables.....	60
5.6	Parámetros configurados en la red implementada.....	61
5.7	Descripción de las funciones de los pines del PIC8F2550.....	69
6.1	Parámetros de configuración función MPUSBGetDeviceOpen.....	90
6.2	Parámetros de configuración función MPUSBOpen.....	90
6.3	Parámetros de configuración función MPUSBWrite.....	91
6.4	Parámetros de configuración función MPUSBRead.....	91
6.5	Parámetros de configuración función MPUSBClose.....	92
6.6	Eventos de alarmas y acciones correctivas.....	95

# **CAPÍTULO I**

## **Introducción**

## **1.1 INTRODUCCIÓN**

Las flores más vendidas en el mundo son, en primer lugar, las rosas seguidas por los crisantemos, tercero los tulípanes, cuarto los claveles y en quinto lugar los liliun. Ninguna flor ornamental ha sido y es tan estimada como la rosa. A partir de la década de los 90 su liderazgo se ha consolidado debido principalmente a una mejora de las variedades, ampliación de la oferta durante todo el año y a su creciente demanda. Sus principales mercados de consumo son Europa, Alemania, Estados Unidos y Japón.

Los países Sudamericanos han incrementado en los últimos años su producción, destacando, México, Colombia y Ecuador. La producción se desarrolla igualmente en África del Este: Zimbabwe y Kenia.

Las flores se han convertido en el producto de mayor exportación, detrás del petróleo, el banano, y los enlatados de pescado (sin tomar en cuenta ni las remesas ni el turismo que entran en los ingresos del Estado Ecuatoriano por concepto de servicios y transferencias).<sup>1</sup>

## **1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

Una de las actividades económicas que en la actualidad está ocupando un sitio importante en el Ecuador, es el cultivo y exportación de flores. En la región sierra del país, se encuentran asentadas una gran cantidad de Plantaciones Florícolas, las mismas que están conformadas por varias hectáreas distribuidas en invernaderos. Las principales zonas productoras de rosas, están ubicadas en las provincias de: Pichincha y Cotopaxi: le siguen en importancia las provincias de Azuay e Imbabura.

Sin embargo, ninguna Plantación Florícola en el Ecuador, dispone de un sistema eficiente de monitoreo que le facilite al operario la toma inmediata de acciones predictivas y correctivas sobre el cultivo, problemática que en la mayoría de los casos se ve reflejada en el deterioro del cultivo. La falta de un monitoreo oportuno de las variables climáticas como: temperatura, iluminación, nivel de CO<sub>2</sub> dentro de los invernaderos, provoca la muerte de las flores si éstas se ven sometidas a duras condiciones climáticas.

Una de las limitaciones más importante que se presenta en la implementación de sistemas de monitoreo de las variables climatológicas dentro de los invernaderos, está orientada al hecho de que proyectos desarrollados hasta el día de hoy han considerado el uso de redes cableadas para el transporte de los datos provenientes desde los diferentes sensores que estarían distribuidos en cada una de las zonas del invernadero hacia una estación maestra (computadora) que sea la encargada en recibir y procesar los datos. Los inconvenientes que conlleva el uso de la red cableada son básicamente los siguientes:

---

<sup>1</sup> Artículo “Flores en el Ecuador pasado y futuro”. Revista Económica Perspectiva del IDE (Escuela de Dirección de Empresas). Enlace web:  
<http://www.ideinvestiga.com/ide/documentos/compartido/gen--000016.pdf>



El presente proyecto presenta como alternativa el desarrollo de un sistema inalámbrico de monitoreo florícola, a través del levantamiento de una red con módulos ZIGBEE, que permita monitorear las variables climáticas de: temperatura ambiente, humedad relativa, humedad del suelo, niveles de CO y luminosidad.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 OBJETIVO GENERAL**

Diseñar e implementar una red inalámbrica, aplicando el estándar de comunicaciones ZIGBEE, para el monitoreo de los sistemas: antiheladas, regadío y ventilación de un prototipo de invernadero inteligente para el cultivo de rosas

### **1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Establecer las variables climáticas que intervienen en los sistemas de regadío, ventilación y antiheladas, que forman parte del adecuado proceso de cultivo de rosas, así como definir los rangos de valores óptimos que éstas variables deben adoptar a lo largo del día para obtener un producto con calidad de exportación
- Seleccionar los sensores adecuados, que permitan captar las variables climáticas que serán monitoreadas en el invernadero, y acondicionamiento de las mismas.
- Diseñar e implementar los circuitos de acondicionamiento de señales para cada uno de los sensores.
- Diseñar e implementar las placas PCBs y la programación adecuada, que permitirán enlazar las variables físicas del invernadero con el puerto UART de los módulos ZIGBEE localizados en diferentes zonas del invernadero.
- Configurar los módulos de comunicación ZIGBEE como nodos bajo topología ESTRELLA.
- Diseñar e implementar una placa PCB y la programación adecuada, para acoplar el puerto UART del módulo ZIGBEE (coordinador), con el puerto USB del computador que monitoreará las variables del invernadero.
- Desarrollar la programación de una HMI (interfaz hombre – máquina) dedicada al: monitoreo de todas las variables físicas que forman parte de los sistemas de riego, antiheladas y ventilación.

## **1.5 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA**

El proyecto desarrollado se encarga del monitoreo de las variables físicas que forman parte de los sistemas de regadío, ventilación y antiheladas en un prototipo de invernadero inteligente ubicado en las instalaciones de la Escuela Politécnica del Ejército Extensión Latacunga. Para lo cual se ha creado una red inalámbrica ZIGBEE, conformada por tres nodos sensores y un nodo coordinador.

En el invernadero, se encuentran desplegados sensores de: humedad relativa, humedad del suelo, luminosidad, CO<sub>2</sub> y temperatura; que generan señales eléctricas analógicas en función de la variable medida, las mismas que ingresan a una etapa de

acondicionamiento de señal a fin de obtener para cada una de ellas un rango de tensión estandarizado de 0 – 5Vcd.

Estas señales analógicas estandarizadas, ingresan a un microcontrolador que se encarga de digitalizarlas y adecuarlas para que puedan ser enlazadas con el puerto UART del módulo ZIGBEE que envía inalámbricamente los datos de los sensores hacia el nodo coordinador.

En el nodo coordinador se concentra toda la información recibida por los tres nodos sensores que estarán desplegados a lo largo de la superficie del invernadero. Un microcontrolador forma parte del nodo coordinador y es el encargado de enlazar los datos concentrados en el puerto UART del módulo ZIGBEE con el puerto USB del computador en el que se va desarrollar la interfaz HMI de monitoreo.

Vía USB, ingresan al computador los datos de los sensores, los mismos que son direccionados hacia LABVIEW por medio de una librería dinámica.

En LABVIEW se realiza la programación para que periódicamente se ejecute una solicitud de envío de información a cada uno de los nodos sensores, se desarrolla la interfaz gráfica de todo el sistema de monitoreo y se genera reportes diarios.

Un aspecto fundamental que se debe considerar en el sistema, es el hecho que los nodos sensores, al ser de tecnología inalámbrica, no disponen de ningún sistema de alimentación cableada, por lo que cada nodo lleva incorporada una batería recargable de 12V.

El voltaje de cada batería también es monitoreado por el sistema, para que se genere una señal de alarma en la interfaz gráfica, en el caso de que el voltaje sea menor al necesario, a fin de que sea planifique adecuada y oportunamente su reemplazo y no deje inhabilitado a ningún nodo.

La figura 1.2, muestra un esquema general del proyecto, identificando a través de diagramas de bloque cada una de las etapas y subsistemas que lo conforman.

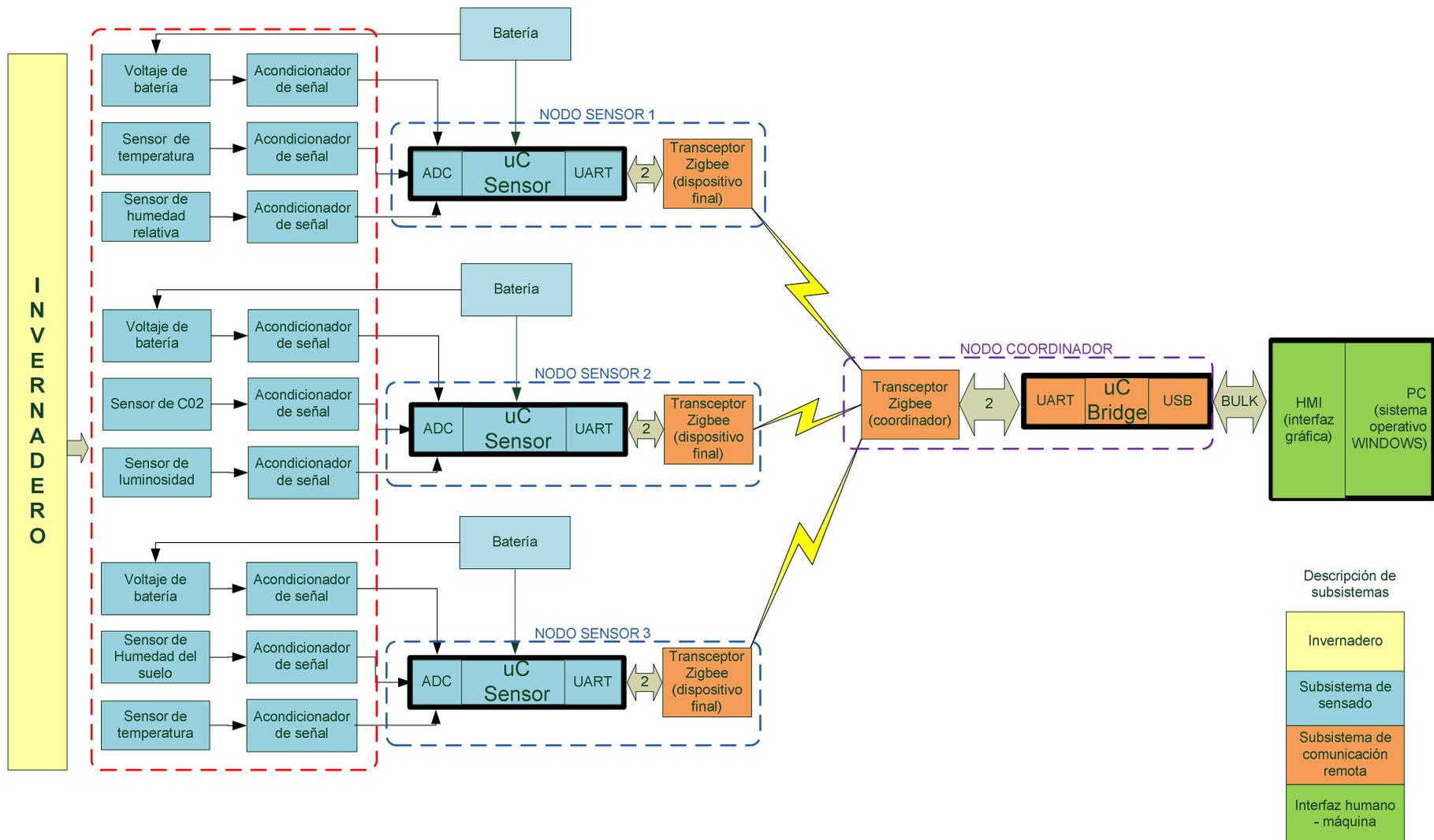


Figura 1.2: Diagrama de bloques del proyecto

Para una explicación detallada de cada etapa del sistema implementado, los siguientes capítulos se han dividido en cinco fases principales que son:

- Invernadero: definiciones, descripción de los sistemas a monitorear e identificación de variables
- Subsistema de sensado.
- Estándar de comunicaciones ZIGBEE IEEE 802.15.4
- Subsistema de comunicación remota.
- Diseño e implementación de la interfaz HMI (Interacción Humano – Máquina) para el monitoreo de las variables físicas del invernadero.

Finalmente se las conclusiones relacionadas a los principales logros obtenidos y se realizará un enfoque a trabajos futuros.

# **CAPÍTULO II**

## **Invernadero**

## 2.1 DEFINICIÓN

Un invernadero es una estructura simple con una cobertura transparente a la luz, y que a su vez ofrece protección contra algunos factores agresivos del clima, (viento, lluvias, bajas temperaturas) que afectan la existencia de las plantas. Es una construcción especial que sirve para crear y mantener las condiciones ambientales apropiadas para el cultivo y producción de especies vegetales como verduras, rosa, etc.



**Figura 2.1: Vista exterior del invernadero implementado en ESPE-LATACUNGA**

Dentro de un invernadero, es posible obtener condiciones climáticas artificiales de microclima, y con ello se logra cultivar plantas fuera de estación en condiciones óptimas.

Las características ideales de un invernadero están influenciadas principalmente por factores como: el volumen del aire y la posibilidad de mantener un ambiente adecuado que permita controlar temperaturas extremas. De ellos dependen, en gran medida, el éxito o fracaso de un cultivo.

Los invernaderos son estructuras que ayudan a intensificar la producción agrícola, al establecer las condiciones apropiadas para acelerar el desarrollo de los cultivos y permitir mayor cantidad de planta por unidad de superficie que la que se puede establecer a campo abierto. Actualmente se apunta a la creación de invernaderos que poseen un sistema de control climático; temperatura iluminación y humedad relativa, para el buen desarrollo de los cultivos. [1]

## 2.2 INVERNADERO INTELIGENTE

Un invernadero inteligente es aquel que mediante sensores, actuadores y software, pueden controlar todas las variables sin la intervención del hombre, logrando una producción más eficiente que la de un invernadero normal.

En un invernadero inteligente se creará un espacio con el microclima apropiado para el óptimo desarrollo de una planta específica, por lo tanto, con el objeto de obtener la temperatura, la humedad relativa y la luminosidad del ambiente y con su posterior

corrección se puede alcanzar alta productividad, en cualquier época del año, alargar el ciclo de cultivo, a bajo costo, en menos tiempo, con menor impacto ambiental, protegiéndolos de las lluvias, el granizo, las heladas o los excesos de viento que pudieran perjudicar el cultivo.

Para controlar el microclima en el interior de un invernadero se utiliza un sistema de control realimentado (Figura 2.2), que se compone de cuatro partes fundamentales:

- Proceso: Variable a controlar (Ej. Temperatura).
- Sistema de medida o elementos que realizan una estimación del valor de la variable a controlar y las demás variables que necesite el controlador (Ej. Sensor de temperatura).
- Controlador: Sistema que compara el valor actual de la variable a controlar con el valor deseado de ésta y toma las decisiones oportunas para que la diferencia entre estos dos valores sea nula. (Ej. Computador y herramienta informática que controlen las variaciones de temperatura).
- Actuadores: Son los dispositivos al que el controlador ordena funcionar para mantener a la variable en los límites deseados. (Ej. Ventilación, calefacción, etc.).

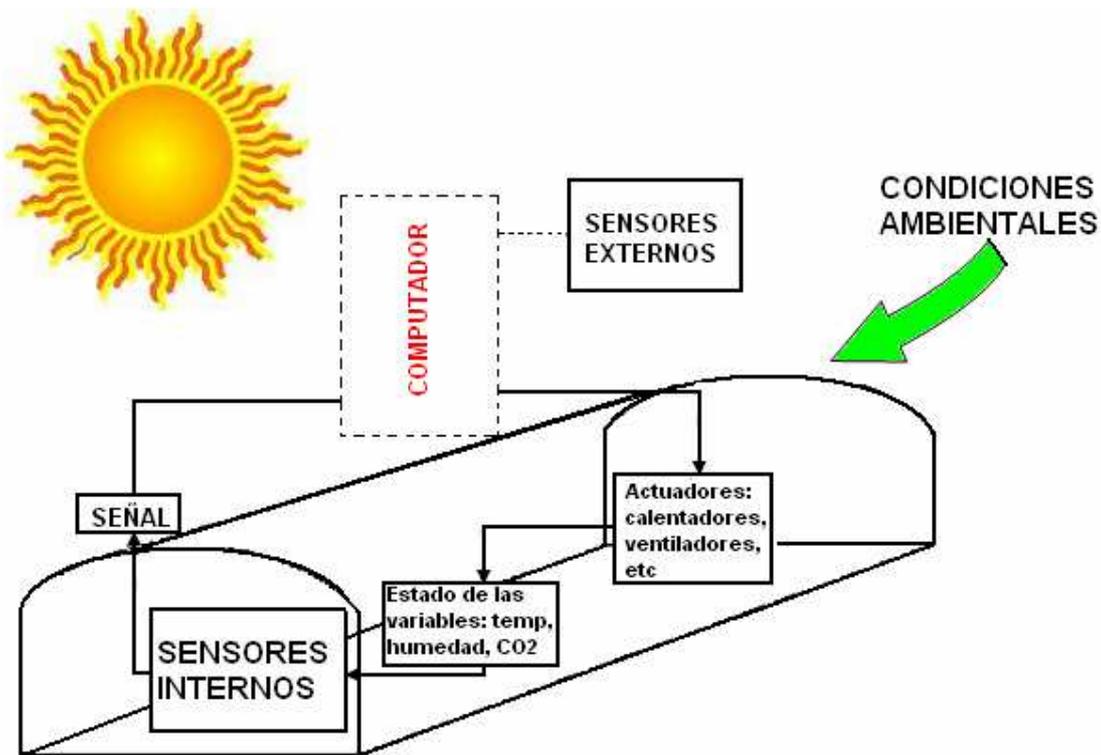


Figura 2.2: Sistema de control del invernadero inteligente

Una vez que el controlador recibe las señales procedentes de los sensores que le informan sobre el estado de las variables, comprueba que éstas se encuentren en los límites permitidos y da las órdenes oportunas a los actuadores para alcanzar el estado global deseado. Si una de las variables no se encuentra dentro de su intervalo permitido da la orden al actuador correspondiente para que actúe en consecuencia.

## 2.3 SISTEMAS DE MONITOREO DEL INVERNADERO

Este proyecto está enfocado al monitoreo de tres sistemas básicos y fundamentales en el adecuado crecimiento de las plantas bajo entornos de microclima:

- Sistema de riego (foliar y por goteo).
- Sistema de ventilación.
- Sistema antiheladas.

Los mismos que se describen a continuación.

### 2.3.1 SISTEMA DE RIEGO

La distribución de la lluvia sobre el planeta es irregular y depende de la forma de las tierras, de los mares, las montañas y la vegetación, depende también de factores climatológicos como: la temperatura y los vientos. Esto hace más o menos posible y más o menos abundante el proceso continuo de la evaporación-condensación-precipitación de los suelos que se utilizan para el crecimiento de cultivos.

Es por ello que es necesario desarrollar técnicas de almacenamiento de agua y de distribución de la misma sobre los cultivos. Por lo tanto, el sistema de riego consiste en la aplicación de agua por métodos artificiales a cualquier superficie dedicada al cultivo de plantas.

El riego es la aplicación oportuna y uniforme de agua a un perfil del suelo para reponer en éste, el agua consumida por los cultivos entre dos riegos consecutivos.

Es necesario conocer que no se riega la superficie del suelo, sino que se está regando el perfil en profundidad; interesa acumular agua dentro del volumen de suelo donde se encuentran las raíces de las plantas que son los órganos encargados de absorber el agua que necesitan éstas para el desarrollo de sus funciones vitales, especialmente la transpiración. [1]

Un buen riego no es el que moja uniformemente la superficie del suelo, sino aquel que almacena agua uniformemente en el perfil del suelo, donde se encuentra la masa de raíces de un cultivo.

Para este trabajo, el invernadero inteligente se diseñó un sistema de riego que puede proporcionar agua a los cultivos mediante: goteo y foliar (en caso de producirse una helada), técnicas que son las más adecuados para la ciudad de Latacunga.

La variable que permite el monitoreo de este sistema es la humedad del suelo.

El **riego por goteo** (figura 2.3) consiste en aportar el agua de manera localizada justo al pie de cada planta. Se encargan de ello los goteros o emisores.



**Figura 2.3: Riego por goteo**

Las ventajas que ofrece un sistema de riego por goteo son:

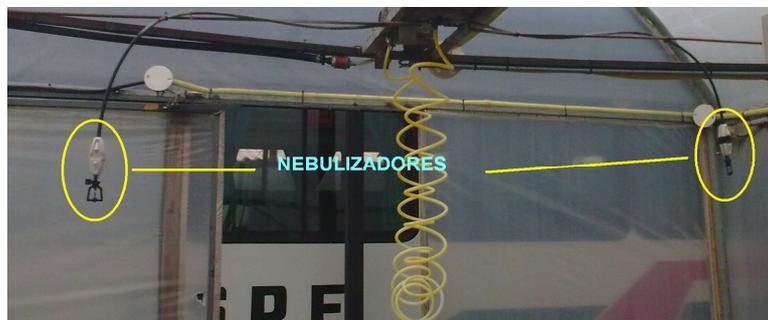
- Ahorro de agua.
- Se mantiene un nivel de humedad en el suelo constante, sin encharcamiento.
- Se pueden usar aguas ligeramente salinas, ya que la alta humedad mantiene las sales más diluidas. Si se usa agua salina, hay que aportar una cantidad extra de agua para lavar las sales a zonas más profundas por debajo de las raíces.
- Con el riego por goteo se puede aplicar fertilizantes disueltos y productos fitosanitarios directamente a la zona radicular de las plantas.

El inconveniente más típico cuando se utiliza el riego por goteo, es que los emisores se atascan fácilmente, especialmente por la cal del agua. Se debe realizar un buen filtrado, si el agua es de pozo.

El **riego por aspersión o foliar** se utiliza cuando se presenta una helada<sup>2</sup> que dañan las hojas y pétalos de las rosas.

El riego foliar o riego por aspersión es un método de irrigación utilizado para incrementar la humedad en el suelo, en este caso con el uso de nebulizadores (figura 2.4) se pretende crear una niebla fina para no causar daños en los cultivos.

El sistema de monitoreo le alertara al operador la presencia de una posible helada, a fin de que este tome los correctivos necesarios.



**Figura 2.4. Riego Foliar (Antihelada)**

---

<sup>2</sup> Helada es un fenómeno climático que consiste en un descenso de la temperatura ambiente a niveles cercanos al punto de congelación

### **2.3.2 SISTEMA DE VENTILACIÓN**

En muchas zonas las temperaturas durante las primeras horas del día son demasiado bajas para ventilar y, sin embargo, los niveles de CO<sub>2</sub> son limitantes para el crecimiento de la planta. Bajo condiciones de invierno en climas fríos donde la ventilación diurna no es económicamente rentable, es necesario aportar CO<sub>2</sub> para el crecimiento óptimo de la planta, elevando los niveles a 1.000ppm. Del mismo modo, si el cierre de la ventilación se efectúa antes del atardecer, a causa del descenso de la temperatura, los niveles de dióxido de carbono siguen reduciéndose debido a la actividad fotosintética de las plantas.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que las rosas requieren una humedad ambiental relativamente elevada, que se regula mediante la ventilación y la nebulización o el humedecimiento de los pasillos durante las horas más cálidas del día.

La aireación debe poder regularse, de forma manual o automática, abriendo los laterales (figura 2.5) y las cumbreiras, apoyándose en ocasiones con ventiladores interiores o incluso con extractores (de presión o sobre-presión). Ya que así se produce una bajada del grado higrométrico y el control de ciertas enfermedades. [1]



**Figura 2.5: Ventana lateral del invernadero (Sistema de ventilación)**

Las variables que se monitorean para este sistema son: temperatura, humedad relativa y nivel de CO<sub>2</sub>.

### **2.3.3 SISTEMA ANTIHELADA**

Desde el punto de vista agrícola, se considera a la helada un evento meteorológico en el que la temperatura ambiente desciende a niveles mínimos, capaces de provocar daño en los cultivos.

Este fenómeno considerado uno de los más peligrosos para el desarrollo de las rosas, ya que puede provocar la destrucción de sus hojas y pétalos,

El monitoreo del sistema antihelada se basa en la lectura de la temperatura medida en distintos puntos del invernadero, así como la operación del riego foliar y del calefactor.

Si la temperatura es muy baja, se advierte al operador para que encienda el calefactor para intentar mantener el invernadero a una temperatura superior a la que se produce la helada, si no se consigue mantener la temperatura interna del invernadero se deberá apagar el calefactor y se enciende el riego foliar que es la mejor forma de evitar que los cultivos sean dañados por las bajas temperaturas. [1]

## 2.4 ANÁLISIS DE LAS VARIABLES FÍSICAS A MONITOREAR

Una vez analizada la función que desempeña cada uno de los sistemas que se van a monitorear, se presenta en la tabla 2.1, el resumen correspondiente;

**Tabla 2.1: Resumen de variables físicas del sistema**

SISTEMA	VARIABLE A MONITOREAR
Riego	Humedad del suelo
Ventilación	Temperatura Humedad relativa Niveles de CO2
Antihelada	Temperatura

La importancia de mantener un monitoreo continuo de las variables físicas del invernadero, radica en el hecho de que cada una de ellas deben mantenerse dentro de unos rangos adecuados, para el crecimiento favorable de los cultivos, en la tabla 2.2 se presenta un análisis de las variables con sus respectivos valores óptimos y los daños que ocasionan sobre las rosas en el caso de que las lecturas monitoreadas se salgan de dichos rangos.

**Tabla 2.2: Análisis de las variables físicas [2]**

VARIABLE	VALORES ÓPTIMOS	DAÑO POR NIVEL ALTO	DAÑO POR NIVEL BAJO
Temperatura	17 – 25 °C	Alteración de permeabilidad.	Estrés térmico.
Humedad del suelo	10 – 20cB <sup>3</sup>	Destrucción de pelos radiculares.	Marchitamiento de las plantas.
Humedad Relativa	60 – 80 %	Podredumbre.	Reducción de fotosíntesis.
CO2	400 – 800ppm <sup>4</sup>	Aumento de plagas.	Contaminación de la planta por tóxicos.
Luminosidad	35 – 98%	Estrés hídrico.	Etiolación en el tallo.

<sup>3</sup> cB Centibares, unidad métrica de presión utilizada tradicionalmente en la agricultura como unidad de la tensión del agua del suelo (la presión del agua en las raíces de las plantas)

<sup>4</sup> PPM (partes por millón) Forma de medir concentraciones pequeñas. 300 ppm equivalen a 0,03%.

# **CAPÍTULO III**

## **Subsistema de sensado**



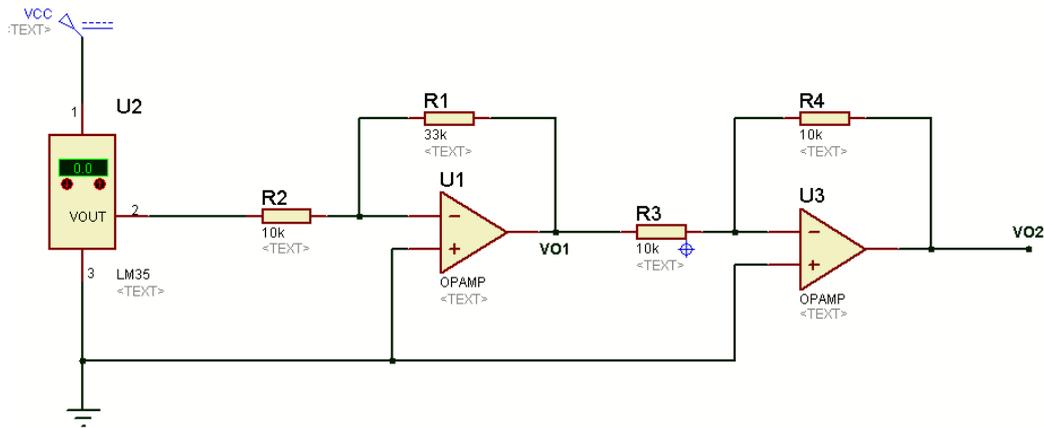


Figura 3.2. Circuito de acondicionamiento del sensor LM35

En función de los siguientes cálculos de diseño:

- **Circuito Amplificador:**

$$VO1 = -\frac{R1}{R2} * Vin$$

$$VO1 = -\frac{33K}{10K} * 1V$$

$$VO1 = -3.3V$$

- **Circuito Inversor:**

$$VO2 = -\frac{R4}{R3} * Vin$$

$$VO2 = -\frac{10K}{10K} * (-3.3V)$$

$$VO2 = 3.3V$$

- La función de transferencia para el sensado de temperatura es:  $V = 0.033T$ , obtenida en función de la figura 3.3.

Figura 3.3: Curva característica del sensado de la temperatura

### 3.3 SENSOR DE HUMEDAD RELATIVA

Para la medición de la humedad relativa se utilizó el sensor DWYER MODELO 65, lleva incorporado un transmisor que presenta a su salida una señal de 4-20mA. Tiene una exactitud del  $\pm 2\%$  para mediciones de humedad y del  $\pm 3\%$  para temperatura.



Figura 3.4: Aspecto físico del sensor - transmisor DWYER 657-1

El sensor de humedad que lleva incorporado es de película de polímero integrada con tecnología de vanguardia, para asegurar gran confiabilidad y estabilidad durante muchos años de servicio continuo. El conexionado básico de los canales de este transmisor, se muestran en la figura 3.5.

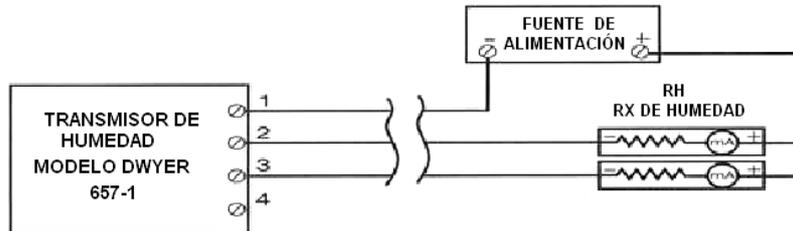


Figura 3.5: Diagrama de conexionado del transmisor DWYER 657-1

Para la selección del sensor – transmisor de humedad, se verificó que las características técnicas mostradas en la tabla 3.2 satisfacen las necesidades de medición de humedad relativa en el invernadero, que maneja rangos de humedad entre 50 – 80 %.

El criterio de selección se orientó en las prestaciones de mayor importancia, como son: rango de medición, voltaje de alimentación y señal de salida; todas estas se ajustan correctamente a los requerimientos del sistema. [5]

Tabla 3.2: Características técnicas DWYER 657-1

CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN
Servicio	Detección de humedad y temperatura en el aire
Intervalo de humedad relativa (RH)	$\pm 2\%$ (10 – 90% RH) $\pm 3\%$ (0 al 10% y 90 al 100% RH)
Límites de temperatura de operación	32 a 158 ° F (0 a 70 ° C)
Límites de presión de operación	1 PSI (0.07 BAR)
Alimentación	10 – 35 VCD
Señal de salida	2 canales cada uno de 4 a 20mA. Lazo de alimentación en el canal de RH (Humedad relativa)
Conexiones eléctricas	4 terminales de tornillo

### 3.4 ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL DE HUMEDAD RELATIVA.

El sensor de humedad relativa DWYER 657-1, varía en un rango de 10 a 90 % de HR (humedad relativa); equivalente a un rango de corriente de salida del sensor de 4 a 20mA. Considerando que el nodo sensor implementado podrá interpretar rangos de 0 a 3.3Vcd se ha optado por implementar el circuito de acondicionamiento [4] mostrado en la figura 3.6.

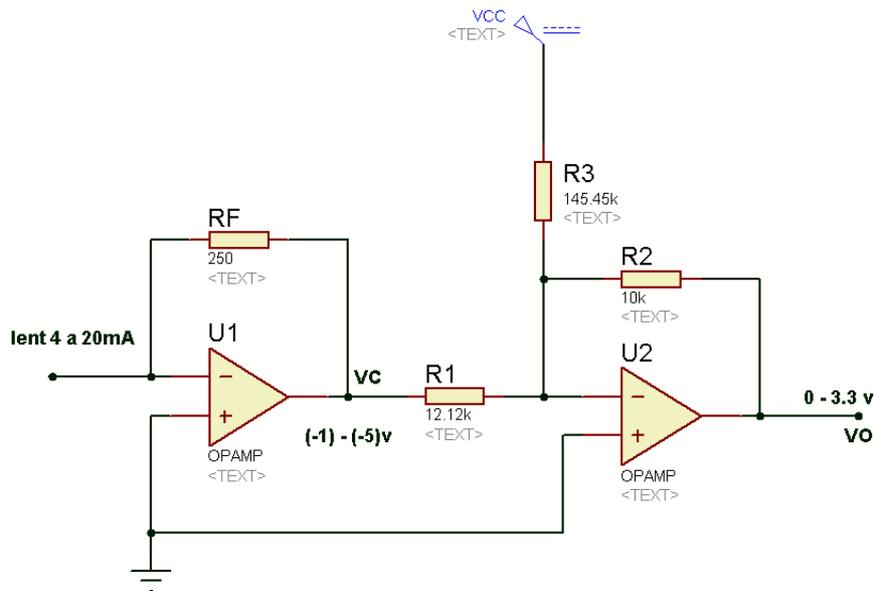


Figura 3.6: Circuito de acondicionamiento del sensor de humedad relativa DWYER 657-1

En función de los siguientes cálculos de diseño:

- **Circuito conversor de corriente a voltaje**

$$VC = -I_{ent} * R_F$$

$$VC = -20mA * 250$$

$$VC = -5V$$

- **Circuito conversor de nivel.**

$$A = \frac{Vo_2 - Vo_1}{Vin_2 - Vin_1}$$

$$A = \frac{3.3}{5 - 1}$$

$$A = 0.825$$

$$A = \frac{R_2}{R_1}$$

$$R_2 = 10k$$

$$R_1 = 12.12K$$

$$B = Vo_1 - AVin_1$$

$$B = -(0.825 * 1)$$

$$B = -0.825$$

$$B = \frac{R_2}{R_3} V_{cc}$$

$$R_3 = \frac{R_2}{B} V_{cc}$$

$$R_3 = \frac{10}{0.825} 12$$

$$R_3 = 145.45 K\Omega$$

- La función de transferencia para el sensado de humedad es:  $V = 0.04125(HR - 10)$ , obtenida en función de la figura 3.7.

humedad

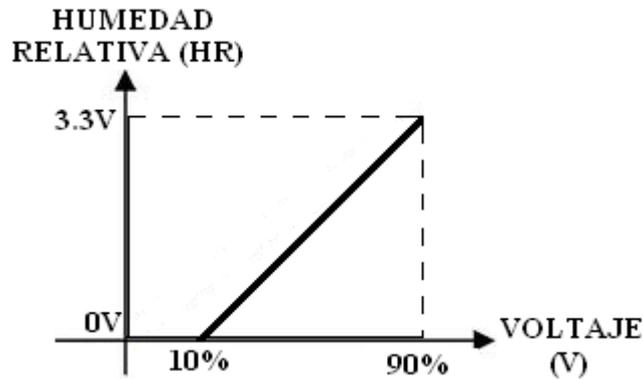


Figura 3.7: Curva característica del sensado de humedad relativa

### 3.5 SENSOR DE CONCENTRACIÓN DE CO<sub>2</sub>

El sensor seleccionado para determinar los niveles de CO<sub>2</sub> dentro del invernadero es el modelo AIRSENSE 310 mostrado en la figura 3.8, es un analizador infrarrojo no dispersivo para medir la concentración de CO<sub>2</sub> en los sistemas de ventilación y en espacios interiores. Su rango de medición está en el orden de 0 - 2000ppm, que permite cubrir el rango necesario para vigilar el cumplimiento de ASHRAE<sup>5</sup> y también se adapta a las condiciones internas del invernadero.

Este sensor viene empaquetado en una caja compacta que se puede instalar en cualquier lugar de una manera discreta y sencilla.



Figura 3.8: Sensor de CO<sub>2</sub> AIR SENSE modelo 310E

Este sensor ofrece las prestaciones adecuadas para satisfacer las necesidades del proyecto. Para la selección del dispositivo se analizaron que las características técnicas mostradas en la tabla 3.3.

<sup>5</sup> AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS (Sociedad Americana de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado)

**Tabla 3.3: Características técnicas AIRSENSE 310E**

<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
Principio de operación	Analizador infrarrojo no dispersivo (NDIR)
Rango de operación	0 – 2000ppm
Desviación típica por año	± 75ppm (@ 1200ppm)
Precisión	±5% de lectura o 75ppm (Lo que sea mayor)
Intervalo recomendado de calibración	5 años
Tiempo de respuesta	Menos de 1 minuto
Rango de temperatura de operación	0 a 50 ° C
Rango De humedad de operación	0 a 90% (Humedad relativa RH sin condensación)
Requisitos de alimentación	20 – 28 VRMS AC 18 – 30 VCD
Consumo de potencia	Menor a 2 W a 24 VCD
Ajustes de calibración	Únicamente SPAN (OFFSET eléctricamente anulado)
Voltaje de salida (lineal)	0 – 10 VCD estándar
Corriente de salida (lineal)	4 - 20mA (RL ≤ 500 Ω)
Tiempo de vida útil	10 años

A continuación se indican las opciones de configuración que pueden ser aplicadas en el sistema:

- Una salida de tensión de 0 – 10 Vcd, la tensión de salida aumenta linealmente de 0 voltios en el umbral de salida de baja a 10 voltios en el umbral de alto rendimiento. Los rangos que vienen seteados por defecto son: umbral de salida baja a 0ppm y umbral de alto rendimiento a 2000ppm.
- Una salida de corriente estándar de 4 a 20mA, ésta se incrementa linealmente a partir de 4mA en el umbral de salida de baja a 20mA en el umbral de alto rendimiento. Los valores de umbral que vienen por defecto de fábrica son: umbral de salida baja a 0ppm y umbral de alto rendimiento a 2000ppm. Si la resistencia total entre las dos terminales de salida excede el máximo de resistencia de bucle especificado ( $RL \leq 500\Omega$ ), la corriente de salida puede ser erróneamente para bajas y altas concentraciones de CO<sub>2</sub>.
- Un contacto de relé que puede ser configurado para abrirse o cerrarse por encima de un punto de SET POINT ajustable por el usuario.

Para elegir si a la salida se desea tener una señal de voltaje o de corriente, existe un selector que se configura a través de jumpers, como se muestra en la figura 3.9, esta configuración se la realiza de acuerdo con las especificaciones del fabricante.

En este caso, se seleccionó la salida del voltaje, ya que como se explicó anteriormente los requerimientos del sistema son señales de salida de los sensores de 0 – 5 Vcd y su acondicionamiento es más sencillo. [6]

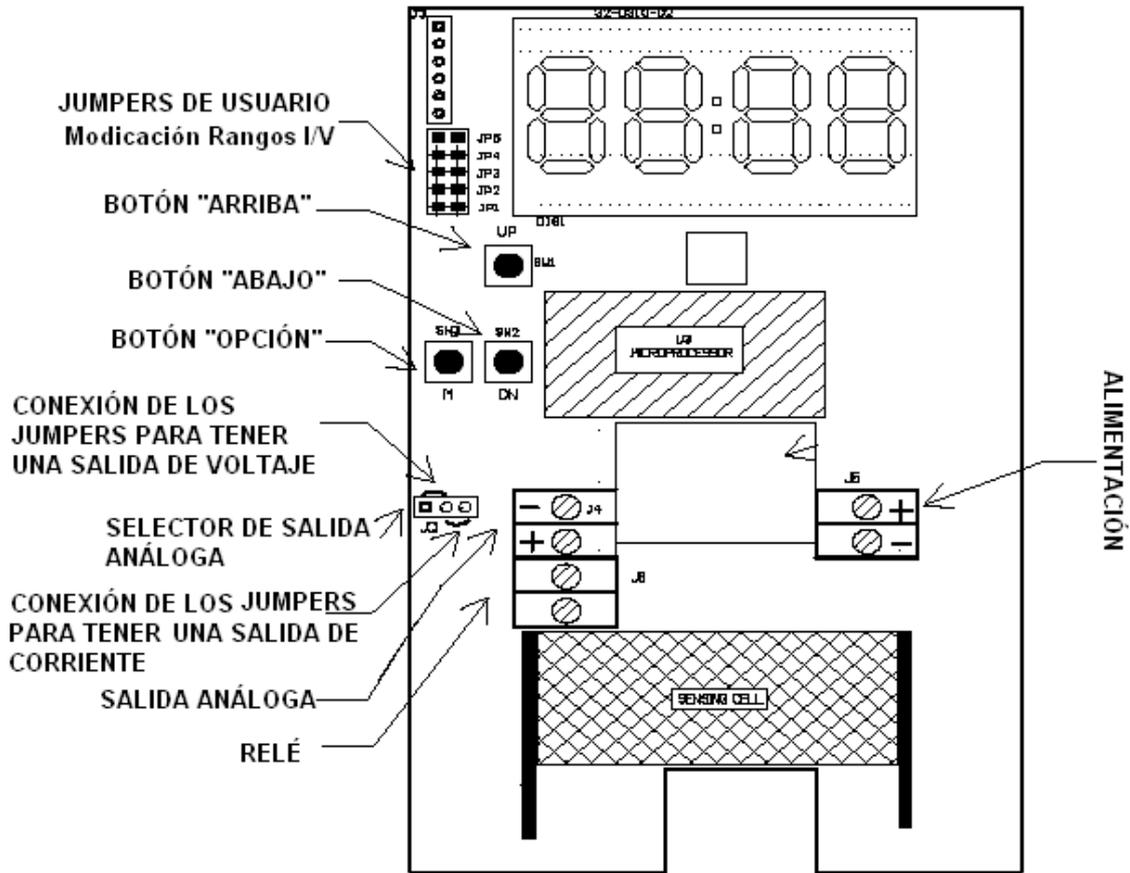


Figura 3.9: Esquema de la localización de componentes de AIR SENSE modelo 310E

### 3.6 ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL DE CO2

El sensor de CO2 AIRSENSE 310E, varía en un rango de 0 a 2000ppm; equivalente a un rango de tensión de salida del sensor de 0 a 10 Vcd. Considerando que el nodo sensor implementado podrá interpretar rangos de 0 a 3.3Vcd se ha optado por implementar un circuito divisor de tensión para la etapa de acondicionamiento mostrado en la figura 3.10:

$$VO = \frac{VT * R2}{R1 + R2}$$

$$VO = \frac{10V * 10K}{10K + 20.3K}$$

$$VO = 3.3V$$

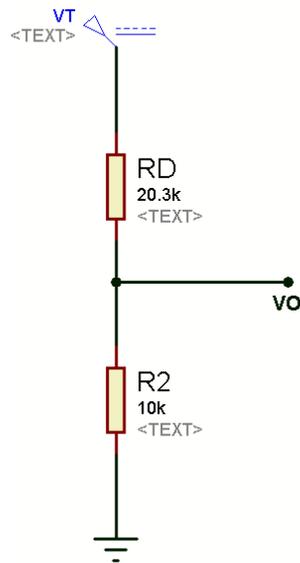


Figura 310: Circuito de acondicionamiento del sensor de CO2 AIRSENSE 510E

- La función de transferencia para el sensado de concentración de CO2 es:  $V = 0.00165(CO2)$ , obtenida en función de la figura 3.11.

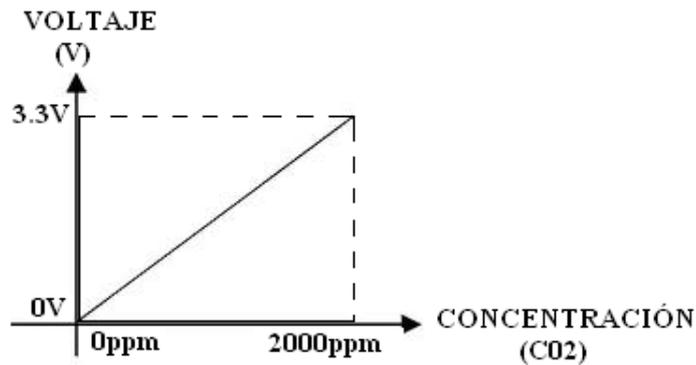


Figura 3.11. Curva característica del sensado de concentración de CO2

### 3.7 SENSOR DE LUMINOSIDAD

Existen varios sensores para la medición de niveles de iluminación, para la medición de luz, en el proyecto se usará como sensor una fotorresistencia, cuyo principio de funcionamiento se basa en la variación de la resistencia en función del cambio de temperatura. Este sensor tiene un costo es bajo y su manejo es muy sencillo [4].

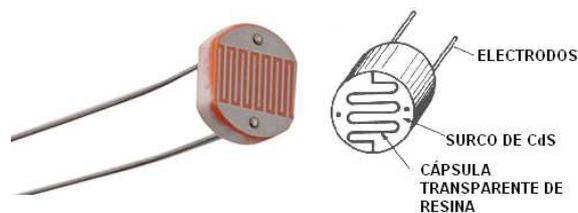


Figura 3.12: Aspecto físico de una fotorresistencia

Las principales ventajas por las que se decidió usar este sensor son:

- Facilidad de acondicionamiento para obtener una señal de salida estándar (4 – 20mA).
- Bajo costo, y buena disponibilidad en el mercado.
- La variación del valor de la resistencia tiene cierto retardo, si se pasa de oscuro a iluminado o viceversa. Esto limita a no usar los LDR en aplicaciones en las que la señal luminosa varía con rapidez. El tiempo de respuesta típico de un LDR está en el orden de una décima de segundo.
- Las fotorresistencias tienen un efecto de memoria a la luz; es decir, su resistencia específica depende de la intensidad y duración de una exposición y al tiempo transcurrido desde una posición anterior.

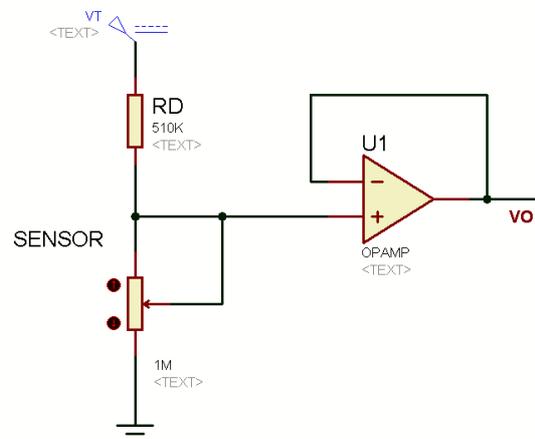
Las características técnicas mostradas en la tabla 3.4 se aplican adecuadamente a los requerimientos del sistema.

**Tabla 3.4. Características técnicas de una fotorresistencia**

CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN
Servicio	Cantidad de iluminación
Tipo de sensor	Resistivo
Resistencia típica en la oscuridad	1MΩ
Resistencia típica con luz brillante	100Ω
Disipación máxima	50mW – 1W
Voltaje máximo	600V

### 3.8 ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL DE LUMINOSIDAD

El sensor de iluminación (fotorresistencia), varía en un rango de 100 Ω (Luz brillante) a 1MΩ (Oscuridad). Considerando que el nodo sensor implementado podrá interpretar rangos de 0 a 3.3Vcd se ha optado por implementar un circuito para la etapa de acondicionamiento [3] mostrado en la figura 3.13.



**Figura 3.13. Circuito de acondicionamiento del sensor de luminosidad LDR.**

En función de los siguientes cálculos de diseño:

- **Circuito divisor de tensión:**

$$VO = \frac{VT * SENSOR}{SENSOR + RD}$$

$$VO = \frac{5V * 1000K}{1000K + 510K}$$

$$VO = 3.3V$$

- La función de transferencia para el sensado de iluminación es:  $V = 0.033Ilum$ , obtenida en función de la figura 3.14.

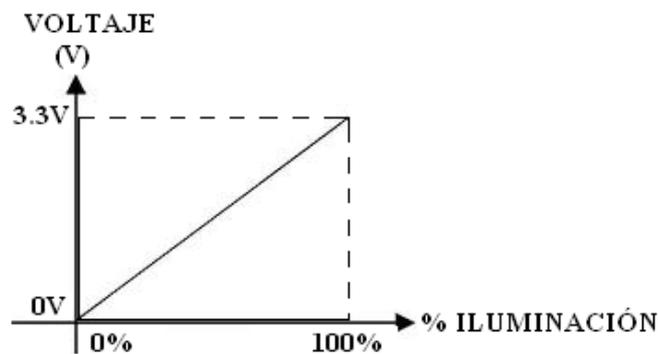


Figura 3.14. Curva característica del sensado de iluminación

### 3.9 SENSOR DE LA HUMEDAD DEL SUELO

El sensor utilizado para determinar la humedad del suelo del invernadero, es el WATERMARK W5SS mostrado en la figura 3.15, que permite realizar la medición de la humedad de la tierra y el control de la frecuencia y dosis de los riegos. Su principio de funcionamiento se basa en medir la fuerza que las plantas hacen para extraer el agua del suelo. Basta con enterrar el sensor en la tierra a la profundidad adecuada.

El sensor de humedad de la tierra de cultivo WATERMARK puede utilizarse en todos los cultivos y con todos los métodos de riego. Se adapta a casi todos los suelos que normalmente se cultivan, hasta los más arcillosos. Puede reflejar tensiones comprendidas entre 0 y 200cB.



Figura 3.15: Sensor de humedad del suelo WATERMARK W5SS

Para la utilización de este componente en la desarrollo del proyecto, se realizaron los siguientes criterios de selección basados en las características técnicas del sensor:

- Presenta una construcción robusta en acero inoxidable y plásticos especiales para una larga vida sin problemas.
- No requiere mantenimiento y pueden dejarse en el suelo durante temporadas enteras ya que tampoco es sensible al frío.
- No precisa de calibración ni ajuste.
- La resistencia a lo largo del par de electrodos colocados dentro de la cubierta del sensor, varía de acuerdo al contenido de humedad.
- Responde rápidamente a los cambios de humedad del suelo. Lleva incorporado 150 metros de cable.
- El uso de éste tipo de sensores, permite: eliminar estimaciones, ahorrar agua, reducir costes de bombeo, suprimir los lavados de nitrógeno debido a riegos demasiado copiosos e innecesarios.

La tabla 3.5 muestra las características técnicas del sensor, que son factor importante para la selección del dispositivo.

**Tabla 3.5: Características técnicas WATERMARK W5SS**

<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
Corriente de consumo	< 1mA
Rango de la señal de salida	550 – 28000 Ω
Rango de medida	0 – 200cb

La interpretación de las lecturas de humedad en el suelo, se lo realiza según la textura del suelo, para esto se muestran los valores de las lecturas y su interpretación en la tabla 3.6.

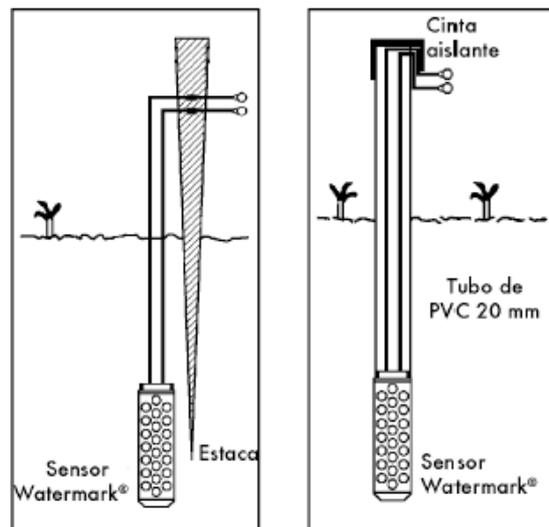
**Tabla 3.6: Interpretación de la humedad del suelo**

<b>LECTURA (cb)</b>	<b>INTERPRETACIÓN</b>
0 – 10	Suelo saturado
10 – 30	Suelo con suficiente humedad. Excepto los suelos de arena gruesa que empiezan a secarse
30 – 60	Margen normal para iniciar el riego excepto en los suelos muy arcillosos
60 – 80	Margen normal para iniciar el riego en los suelos muy arcillosos
80 +	El suelo se está secando peligrosamente

La profundidad a la que se debe colocar el sensor, depende de la profundidad de las raíces del cultivo, la cual depende a su vez, de la profundidad y textura del suelo. El criterio adecuado es el de situar el sensor en la zona radicular (capa del suelo que contiene raíces de plantas) efectiva. Para el caso de cultivos de enraizamiento somero, como lo son las rosas, la zona radicular efectiva es menor a 35 cm.

El sensor puede ser sujetado a una estaca o pasar a través de un tubo, como se observa en la figura 3.16, se debe tener cuidado que los electrodos estén aislados correctamente para que la medición realizada sea la correcta.

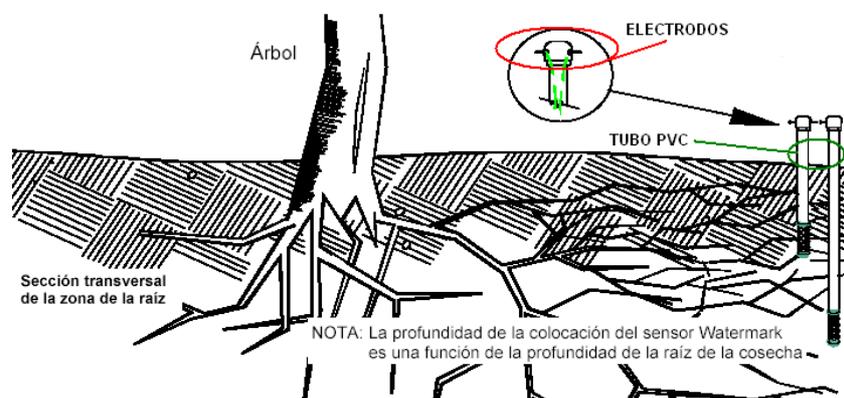
Es imprescindible que el sensor esté siempre bien humedecido en el momento de su colocación, además, a fin de evitar cualquier daño que podría provocarse en la membrana exterior del sensor por su roce con partículas secas y abrasivas, es conveniente que el suelo también esté bien húmedo. [7]



**Figura 3.16: Instalación del sensor de humedad del suelo WATERMARK W5SS**

Utilizando dos sensores a diferentes profundidades de la zona radicular, como se muestra en la figura 3.17, se conocerá de manera más efectiva cuando y cuánto hay que regar, mediante el siguiente análisis:

- Si el sensor más superficial indica sequedad, mientras el más profundo marca la existencia de humedad suficiente, pueden aplicarse los riegos en ciclos más cortos (mayor frecuencia y menor volumen) para humedecer la parte superior del sistema radicular.
- Si el sensor más profundo indica falta de agua, se darán riegos más copiosos, capaces de humedecer estos niveles del terreno.



**Figura 3.17: Instalación de dos sensores de humedad a distinta profundidad**

### 3.10 ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL DE HUMEDAD DEL SUELO

El sensor de humedad del suelo WATERMARK W5SS, varía en un rango de 0 a 200 cb; equivalente a un rango de resistencia de salida del sensor de 550 a 28000 Ω. Considerando que el nodo sensor implementado podrá interpretar rangos de 0 a 3.3Vcd se ha optado por implementar el circuito de acondicionamiento mostrado en la figura 3.18.

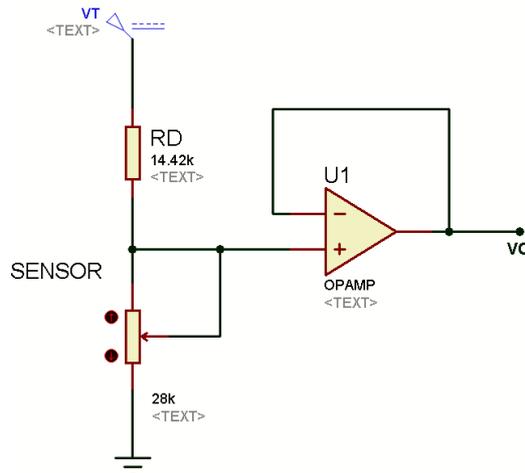


Figura 3.18: Circuito de acondicionamiento del sensor de humedad del suelo.

En función de los siguientes cálculos de diseño:

- **Circuito divisor de tensión**

$$VO = \frac{VT * SENSOR}{SENSOR + RD}$$

$$VO = \frac{5V * 28K}{14.42K + 28K}$$

$$VO = 3.3V$$

- La función de transferencia para el sensado de humedad del suelo es:  $V = 0.0165HS$ , obtenida en función de la figura 3.19.

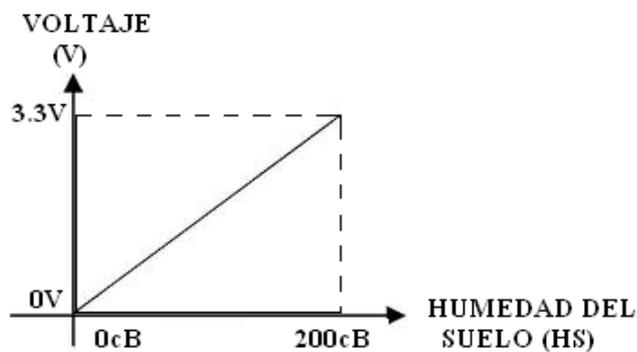


Figura 3.19: Curva característica del sensado de humedad del suelo

### 3.11 BATERÍAS DE LOS NODOS SENSORES

Los nodos sensores ZIGBEE están implementados teniendo como alimentación principal una batería. Las redes sensoriales inalámbricas de corto alcance se manejan un consumo de corriente promedio bastante bajo.

Las baterías son descritas por una serie de parámetros que sirven de guía para la selección de la más eficiente en determinada actividad.

Uno de estos parámetros es la “Capacidad Nominal”, descrita por los proveedores.

Este parámetro hace referencia al uso en un escenario específico. A partir de la capacidad nominal y la capacidad real detectada en la aplicación se obtiene el “Factor de Eficiencia de la Batería”, descrito como una razón entre el valor real y el esperado de la capacidad de la misma.

Otra característica de importancia es la razón de auto-descarga. Una batería, aunque no esté en uso, pierde su capacidad inicial con el paso del tiempo dado a fugas internas.

Los fabricantes describen este parámetro de fuga como la “Auto-descarga Mensual”. El tiempo de almacenamiento de una batería es descrito como el intervalo temporal que puede permanecer almacenada hasta que su capacidad cae por debajo del 80% original. [20]

Básicamente se pueden considerar tres métodos para reducir el consumo energético en una red inalámbrica.

- Selección de equipo de mejor calidad.
- Mejorar la eficiencia de operación de la red.
- Implementar un enrutamiento eficiente.

La batería seleccionada es FIRST POWER FP 1212 (figura 3.20), cuyas características se muestran en la tabla 3.7.



Figura 3.20: Batería de 12Vcd FIRST POWER FP1212

**Tabla 3.7: Características técnicas batería FP1212**

<b>PARÁMETRO</b>	<b>VALOR</b>	
Voltaje nominal	12V	
Capacidad 25°C	20HR (10.5V) 10HR (10.5V) 1HR (9.60V)	1.2 Ah 1.12Ah 0.78Ah
Resistencia interna a plena carga 25°C	Aproximadamente 90mΩ	
Auto-descarga 25°C	3 meses 6 meses 2 meses	Capacidad restante: 91% Capacidad restante: 82% Capacidad restante: 65%
Temperatura nominal de operación	25°C ± 3°C	
Capacidad afectada por la temperatura (20HR)	40°C 25°C 0°C -15°C	102% 100% 85% 65%
Tensión de carga flotante (25°C)	13.60 – 13.8V Compensación de temperatura: -18mV/°C	
Tensión cíclica de carga (25°C)	14.50 – 4.90V Compensación de temperatura: -30mV/°C	
Corriente de carga máxima	0.36A	
Corriente de descarga máxima	18A(5sec)	
Tiempo de vida (20°C)	3 a 5 años	

El nivel de voltaje de la batería es un parámetro que también será monitoreado, ya que al tener un nivel de descarga crítico, el sistema generará una alarma de aviso, a fin de que pueda planificarse adecuadamente su reemplazo. El circuito de acondicionamiento para ingresar el voltaje de la batería al módulo ZIGBEE, es parte de las placas PCB de cada nodo sensor, que se indicará posteriormente.

### **3.12 SELECCIÓN DEL MICROCONTROLADOR DE LOS NODOS SENSORES**

Se denomina microcontrolador a un dispositivo programable capaz de realizar diferentes actividades que requieren procesamiento y control de datos digitales, así como gestión de la comunicación digital de diferentes dispositivos.

La elección de un microcontrolador (arquitectura, marca y modelo) se basa en sus características de memoria de programa y de datos adecuados para la aplicación, velocidad, disponibilidad de puertos (que serán requeridos por los dispositivos a ser conectados), periféricos internos incluidos como son los conversores análogo / digital.

Cada NODO SENSOR está formado por: un microcontrolador y un módulo ZIGBEE.

El microcontrolador capta las señales analógicas (0 – 5 Vcd) provenientes de los sensores y las convierte a digitales para procesarlas y enviarlas al puerto UART del

módulo ZIGBEE que efectúa la comunicación inalámbrica con el NODO COORDINADOR, es decir que el microcontrolador que se seleccione como características indispensables debe incluir la opción de conversión Análoga / Digital y la comunicación vía puerto UART.

En función de lo indicado, se decidió trabajar con el microcontrolador PIC16F88 (se utilizó 3, uno para cada nodo sensor), el mismo que entre las características más relevantes por las que se decidió emplear en este sistema tenemos:

- Tecnología NANO WATT (Bajo consumo de corriente)
- Conversor Análogo / Digital con 10 bits de precisión (Es posible representar números desde 0 – 1023)
- Comunicación vía UART Asincrónico.
- Rango de voltaje de 2 – 5.5V
- Facilidad de conseguirlo en el medio.
- Programación sencilla.
- Bajo costo.

El **PIC16F88** es un microcontrolador de la familia PIC, fabricada por la empresa Microchip. Posee una arquitectura de 18 pines, y un set de instrucciones RISC<sup>6</sup> muy amigable para memorizar y fácil de entender, internamente consta de:

- Memoria Flash de programa (4K x 14).
- Memoria EEPROM de datos (256 x 8).
- Memoria RAM (368 registros x 8).
- Oscilador interno de 8MHz.
- Modulación por ancho de pulso (PWM) de 10Bits,
- Comunicación asincrónica USART en SPI 3 Hilos o I2C en 2 hilos
- Conversor de Analógico a Digital de 7 canales
- Un temporizador/contador (TIMER de 8 bits).
- Un divisor de frecuencia.
- Varios puertos de entrada-salida (16 pines en dos puertos, 8 pines el puerto A y 8 pines el puerto B).
- Manejo de interrupciones (de 4 fuentes).
- Perro guardián (WATCHDOG).
- Bajo consumo.
- Frecuencia de reloj externa máxima 20MHz. La frecuencia de reloj interna es un cuarto de la externa, lo que significa que con un reloj de 20Mhz, el reloj interno sería de 5Mhz y así pues se ejecutan 5 Millones de Instrucciones por Segundo (5 MIPS)
- Pipe-line de 2 etapas, 1 para búsqueda de instrucción y otra para la ejecución de la instrucción (los saltos ocupan un ciclo más).
- Repertorio de instrucciones reducido (RISC), con tan solo 35 instrucciones distintas.

---

<sup>6</sup> REDUCED INSTRUCTION SET COMPUTER - Computadora con Conjunto de Instrucciones Reducido. Tipo de arquitecturas de computadoras que promueve conjuntos pequeños y simples de instrucciones que pueden tomar poco tiempo para ejecutarse.

- 4 tipos distintos de instrucciones, orientadas a byte, orientadas a bit, operación entre registros, de salto.
- Puede ser programado tanto en lenguaje ensamblador como en Basic y principalmente en C, para el que existen numerosos compiladores. Para el desarrollo de este proyecto, se utilizó Lenguaje C, como se explicará más adelante. [8] y [9]

### **3.13 DIAGRAMAS DE CONEXIÓN DEL MICROCONTROLADOR PIC16F88**

Para el desarrollo de los circuitos esquemáticos y el diseño de las placas PCB para los tres NODOS SENSORES y para el NODO COORDINADOR se utilizó EAGLE CADSOFT<sup>7</sup> Versión 5.0.0.

EAGLE LAYOUT EDITOR es un software que permite realizar esquemas de circuitos electrónicos y luego de realizados llevarlos a un diseño de circuito impreso. Está muy bien diseñado y es bastante fácil de usar. [11]

Para realizar las simulaciones del comportamiento de cada nodo, se trabajó con PROTEUS<sup>8</sup> Versión 7.7.

PROTEUS es una compilación de programas de diseño y simulación electrónica, desarrollado por LABCENTER ELECTRONICS que consta de los dos programas principales: Ares e ISIS, y los módulos VSM y Electra. Para las simulaciones realizadas se trabajó con el programa ISIS y el módulo VSM.

El Programa ISIS, INTELLIGENT SCHEMATIC INPUT SYSTEM (Sistema de Enrutado de Esquemas Inteligente) permite diseñar el plano eléctrico del circuito que se desea realizar con componentes muy variados, desde simples resistencias, hasta alguno que otro microprocesador o microcontrolador, incluyendo fuentes de alimentación, generadores de señales y muchos otros componentes con prestaciones diferentes. Los diseños realizados en ISIS pueden ser simulados en tiempo real, mediante el módulo VSM, VIRTUAL SYSTEM MODELING (Sistema Virtual de Modelado), asociado directamente con ISIS.

En la figura 3.21, se muestra el conexionado realizado al PIC16F88, que es el mismo que se aplicó en cada NODO SENSOR.

La tabla 3.8, resumen la función que desempeña cada pin utilizado en el microcontrolador PIC16F88.

---

<sup>7</sup> Sitio oficial: <http://www.cadsoft.de/>

<sup>8</sup> Sitio oficial: <http://www.labcenter.com/index.cfm>

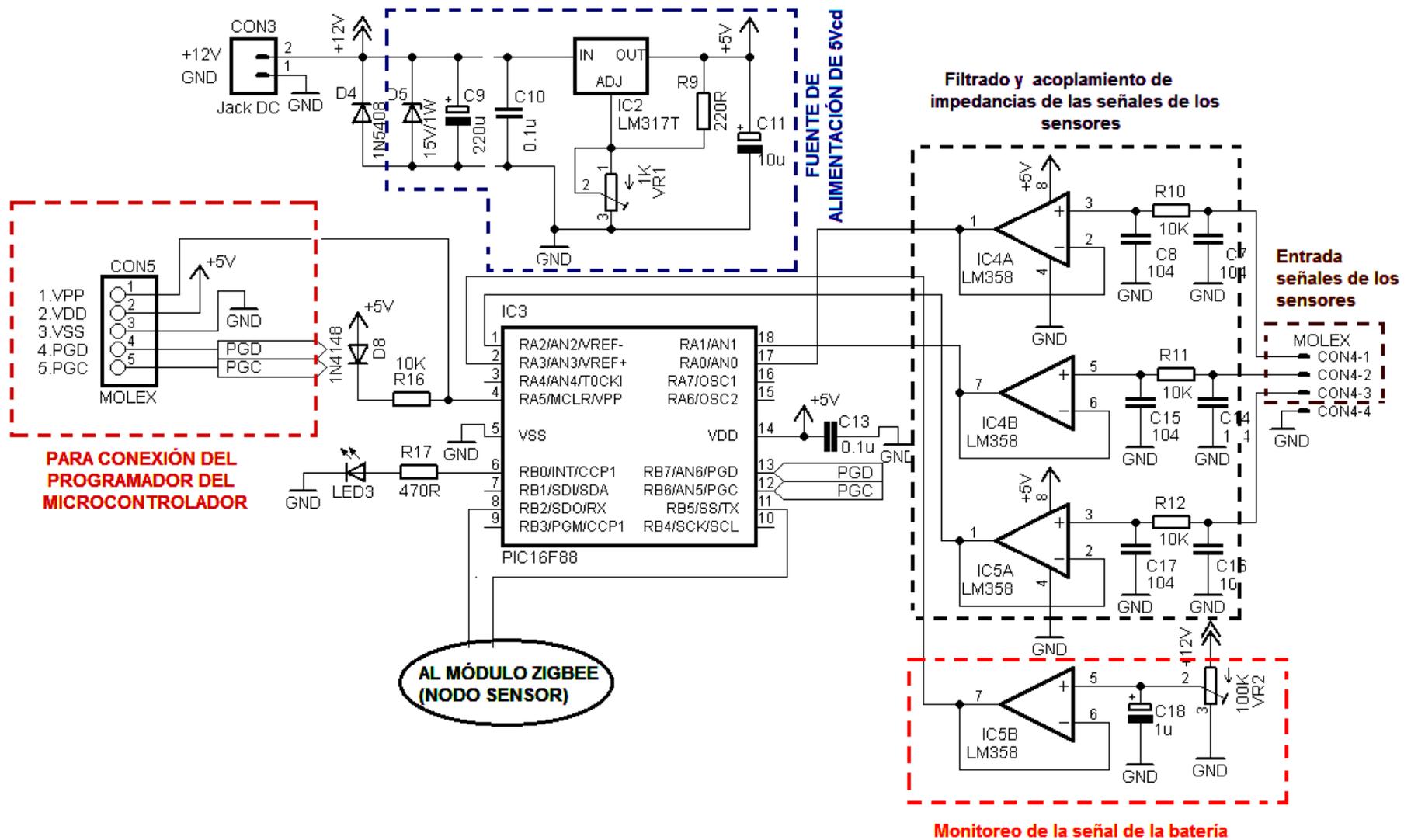


Figura 3.21: Diagrama de conexionado del PIC16F88 que forma parte de un NODO SENSOR

**Tabla 3.8: Descripción de las funciones de los pines del PIC16F88**

<b>PIN</b>	<b>NOMBRE</b>	<b>FUNCIÓN</b>
1	RA2	Entrada de la señal del sensor No 2
2	RA3	Entrada del voltaje de la batería
3	RA4	No utilizado
4	VPP	Voltaje de programación
5	VSS	Tierra (GND)
6	INT	Led que se enciende cuando está enviando datos al módulo ZIGBEE
7	RB1	No utilizado
8	RX	Recepción de datos enviados por el módulo ZIGBEE (NODO SENSOR)
9	RB3	No utilizado
10	RB4	No utilizado
11	TX	Envío de datos al módulo ZIGBEE (NODO SENSOR)
12	PGC	Conexión del programador del microcontrolador
13	PGD	Conexión del programador del microcontrolador
14	VDD	Alimentación de 5Vcd
15	RA6	No utilizado
16	RA7	No utilizado
17	RA0	Entrada de la señal del sensor No 0
18	RA1	Entrada de la señal del sensor No 1

### **3.14 COMUNICACIÓN VÍA UART - USART**

**UART** son las siglas de "UNIVERSAL ASYNCHRONOUS RECEIVER-TRANSMITTER" (Transmisor-Receptor Asíncrono Universal). Éste controla los puertos y dispositivos serie. Las funciones principales de UART son:

- Manejar las interrupciones de los dispositivos conectados al puerto serie.
- Convertir los datos en formato paralelo, transmitidos al bus de sistema, a datos en formato serie, para que puedan ser transmitidos a través de los puertos y viceversa.

El puerto UART toma bytes de datos y transmite los bits individuales de forma secuencial. En el destino, un segundo UART reensambla los bits en bytes completos. La transmisión serie de la información digital (bits) a través de un cable único u otros medios es mucho más efectiva en cuanto a costo que la transmisión en paralelo a través de múltiples cables.

**USART** es el acrónimo de *Universal* SYNCHRONOUS/ASYNCHRONOUS RECEIVER TRANSMITTER (Transmisor y Receptor Sincrónico/Asincrónico Universal).

Se trata de un periférico para la transmisión de datos en formato serie, utilizando técnicas de transmisión sincrónica o asincrónica, según se configure el periférico.

Sus salidas, generalmente son del tipo TTL, aunque actualmente también se pueden encontrar otros niveles lógicos dentro de la gama de valores aceptados por el estándar IEEE, para sistemas digitales. Para comunicar dispositivos distintos, mediante cables de conexión, se debe utilizar el circuito integrado MAX232 o MAX485 para adaptar los niveles de tensión a los utilizados por RS-232 o RS-485 respectivamente.

La característica más destacable de este tipo de periféricos es que utiliza solamente dos terminales para el envío y recepción de datos, en cualquiera de los dos modos de trabajo.

En el caso de las comunicaciones sincrónicas uno de los terminales se comporta como reloj (CLK) y el otro como datos (DT). Este tipo de comunicaciones generalmente demanda el uso de más E/S del dispositivo, por ejemplo un microcontrolador, para gestionar el uso del canal de comunicaciones, la ventaja que tiene radica en que no se requiere realizar una configuración previa de los dispositivos conectados al medio de comunicación.

Para las comunicaciones asincrónicas, se destina un terminal a la transmisión (TX) y otro a la recepción (RX), en este caso el sincronismo se hace dentro de cada equipo y la interfaz solo define el uso de un bit de START y otro de STOP, para indicar el inicio y fin de transmisión de un byte, es por eso que todos los equipos interconectados deben estar configurados para el mismo BIT-RATE.

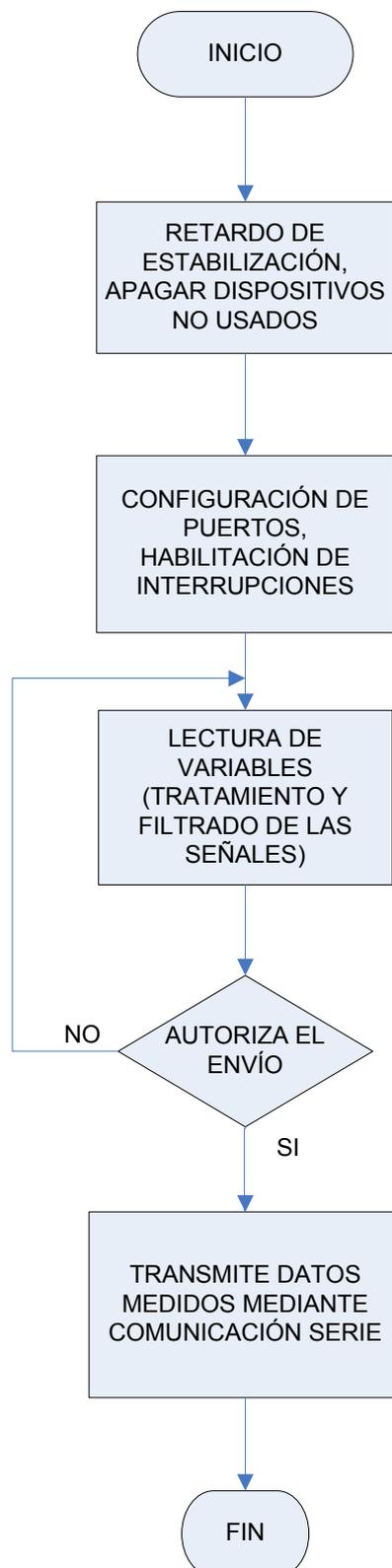
Las ventajas más importante de este modo de comunicación radica en que no se requiere destinar más entradas / salidas a completar algunas interfaces como la RS-232, en su forma más reducida y en que se puede transmitir y recibir al mismo tiempo con un solo periférico. [12]

### **3.15 PROGRAMACIÓN DEL MICROCONTROLADOR DE LOS NODOS SENSORES**

Se decidió utilizar como lenguaje programador C, debido a que presenta las siguientes ventajas:

- Más eficiente ya que utiliza menos líneas de código que otros programadores como ASSEMBLER y por ende su procesamiento es más rápido.
- Es un lenguaje de programación con alta portabilidad, puede ser utilizado tanto en macro-ordenadores como en mini y micro-ordenadores.
- Es muy potente en lo que se refiere a creación de sistemas complejos, un lenguaje muy robusto.
- Muy apropiado para controlar rutinas hechas en ensamblador.
- Posibilita una programación estructurada o modular.
- Presenta un equilibrio entre el lenguaje de bajo y alto nivel, por lo que se puede clasificar como lenguaje de bajo-medio nivel.

En las figura 3.22 y 3.23 se esquematiza mediante diagramas de flujo la programación realizada para cada NODO SENSOR.



**Figura 3.22: Diagrama de flujo del programa principal del NODO SENSOR**

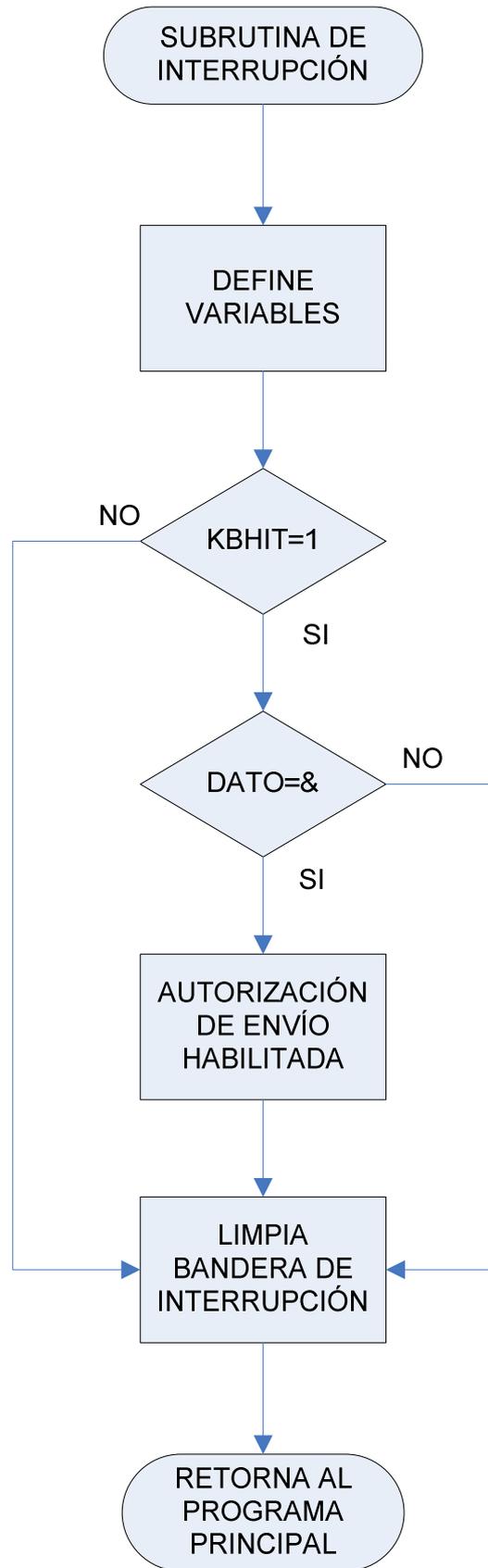


Figura 3.23: Diagrama de flujo de la sub-rutina de interrupción del NODO SENSOR

# **CAPÍTULO IV**

## **Estándar de comunicaciones ZIGBEE 802.15.4**

## 4.1 GENERALIDADES

Actualmente se dispone de un gran número de estándares inalámbricos (BLUETOOTH, WIFI, WIMAX, etc.) orientados hacia aplicaciones con altos requerimientos de ancho de banda (redes domésticas y de oficina, video-conferencia, VoIP, etc.), pero ninguno de estos estándares se adecua para redes de sensores en aplicaciones industriales y domésticas, que requieren una baja tasa de envío de bits y bajos requerimientos de energía.

Por estas razones, surgió la necesidad de crear un nuevo estándar inalámbrico que asocie autonomía, envío de datos de baja capacidad y bajo costo. Es así que apareció el estándar IEEE802.15.4.

El nombre comercial de este estándar es ZIGBEE, debido a la asociación que se produjo entre ZIGBEE ALLIANCE (Alianza ZIGBEE) y la IEEE.

La Alianza ZIGBEE es un consorcio de empresas fabricantes de semiconductores, proveedores de tecnología, fabricantes de equipos originales (OEMs) y usuarios finales, que han desarrollado una norma común para la gestión de redes inalámbricas de sensores y automatización. La alianza tiene alrededor de 150 miembros.

A las redes desarrolladas por este estándar se las conoce con LR-WPAN (LOW RATE WIRELESS PERSONAL AREA NETWORK), debido a sus bajas tasas de transmisión y su corto alcance.

Algunas de las características más importantes del estándar ZIGBEE, se muestran en la tabla 4.1.

**Tabla 4.1: Principales características del estándar 802.15.4**

CARACTERÍSTICA	RANGO
Bandas de frecuencia	868 – 868.8MHz (Europa) 902 - 928MHz (Norte América) 2400 – 2483.5MHz (Todo el mundo)
Alcance	10 – 75 metros
Retardo (Latencia)	Menor a 15mseg
Número de canales	868 – 868.8/902 - 928MHz: 11 canales 2400 – 2483.5MHz: 16 canales
Rango de transmisión de datos	868 – 868.8MHz: 20kbps 902 - 928MHz: 40kbps 2400 – 2483.5MHz: 250kbps
Direccionamiento	64 bits Adicional : Corto de 16 bits
Nodos por red	Hasta 65536 Hasta 255 por subred
Canal de acceso	CSMA-CA CSMA-CA Rasurado
Temperatura	Rango de temperatura industrial: -40 a 85 ° C

Los factores más importantes que hace de ZIGBEE un estándar inalámbrico ideal para redes de sensores son:

- Bajo costo
- Alta fiabilidad
- Seguridad
- Bajo consumo de energía
- Simplicidad
- Interoperabilidad con otros dispositivos ZIGBEE de otros fabricantes
- Tecnología de auto-organización y auto-reparación.
- Redes PLUG AND PALY (conectar y funcionar)
- No necesitan ser configurados cada que se conectan por el usuario y pueden adaptarse a los cambios de la red automáticamente.
- El tiempo total que cualquier dispositivo de la red permanecerá en cualquier tipo de actividad es bastante limitado, la mayor parte del tiempo estará en adormecido, un modo de operación para de ahorro energético.[12]

## 4.2 TIPOS DE DISPOSITIVOS

En una red basada en el estándar IEEE 802.15.4 se trabaja con dos tipos de dispositivos básicos:

- Los FFD (dispositivos de funcionalidad completa)
- RFD (dispositivos de funcionalidad reducida).

**UN DISPOSITIVO FFD:** Es capaz de ejecutar cualquier tarea de red descrita en el estándar IEEE 802.15.4, y puede aceptar cualquier papel dentro de la misma.

**UN DISPOSITIVO RFD:** tiene capacidades limitadas, opera con la mínima implementación del protocolo IEEE 802.15.4. Por ejemplo, un FFD puede comunicarse con cualquier otro dispositivo en la red, mientras que un RFD puede hablar sólo con otros FFD. Los RFD tienen como objetivo el desarrollo de aplicaciones simples. Sus capacidades de procesamiento y tamaño de memoria son usualmente menores a las de los FFD.

En una red ZIGBEE, un FFD puede asumir uno de tres roles distintos:

- Coordinador
- Enrutador
- Dispositivo Terminal.

**EL COORDINADOR:** Es el tipo de dispositivo más completo. Existe uno por red, independientemente de la topología utilizada. Es el encargado de iniciar la red y definir la frecuencia del canal de comunicación a usar, define también el PAN ID (identificador

de red), administrar los nodos de la red y almacenar información sobre estos. Es el responsable de la asociación y disociación de dispositivos.

**EL ENRUTADOR:** Será el responsable de dirigir el encaminamiento de los mensajes entre los nodos de la red. Interconecta dispositivos separados en la topología de la red. Se asocia con el coordinador de la red o con otro ROUTER. No puede estar en estado de SLEEP.

**EL TERMINAL O DISPOSITIVO FINAL:** Es un dispositivo simple, su papel puede ser asumido por un RFD, trabaja con la adquisición directa de los datos y la comunicación de estos a su dispositivo superior inmediato (Enrutador o Coordinador). Poseen la funcionalidad necesaria para comunicarse con su nodo padre (Enrutador o Coordinador), pero no puede transmitir información destinada a otros dispositivos. De esta forma, este tipo de dispositivo puede estar dormido la mayor parte del tiempo, aumentando la vida media de sus baterías. Tiene requerimientos mínimos de memoria y por tanto es significativamente más barato. Los dispositivos finales siempre se localizan en los extremos de la red. [13]

### 4.3 ARQUITECTURA

La sociedad creada por la Alianza ZIGBEE y la IEEE, consistía en que la IEEE 802.15.4 define el hardware físico (capa física PHY) y la capa de acceso al medio de la red (MAC), mientras que la Alianza ZIGBEE define las capas superiores. Es así que la Alianza ZIGBEE ha añadido las especificaciones de las capas de red (NWY) y de aplicación (APL) para completar lo que se llama la pila o STACK ZIGBEE, que se muestra en la figuras 4.1 y 4.2.



Figura 4.1: Arquitectura ZIGBEE

Comparando con otros estándares inalámbricos, el STACK ZIGBEE es pequeño. Para dispositivos de puente de red con capacidad limitada, el STACK requiere cerca de 4Kb de memoria. La implementación completa del protocolo requiere menos de 32Kb de memoria. El coordinador de red requiere memoria RAM extra para una base de datos de dispositivos nodo, tablas de transición y para las tablas de emparejamiento. [14]

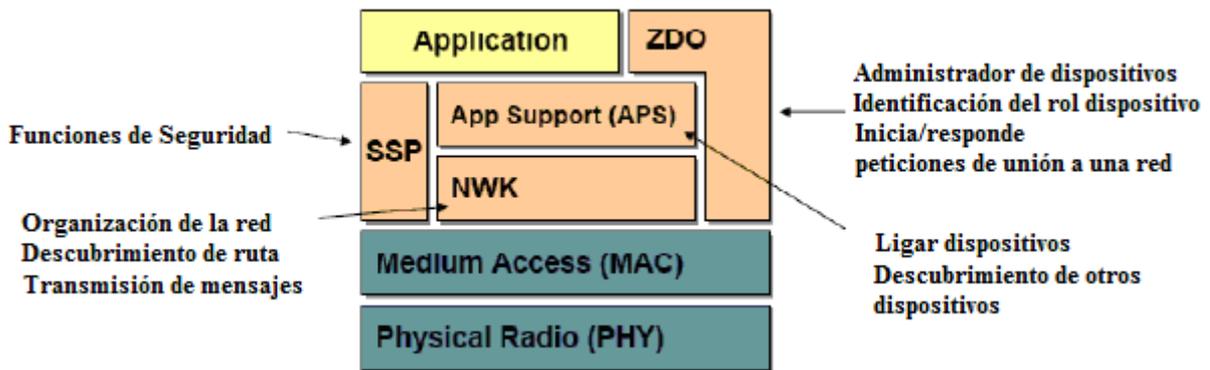


Figura 4.2: STACK ZIGBEE

### 4.3.1 CAPA FÍSICA (PHY)

La capa física define las frecuencias de radio RF que se utilizará para los enlaces y los mecanismos de control de bajo nivel.

Es la capa más baja del protocolo. Es la más cercana al hardware y se comunica y controla, directamente, al transceptor de radio. Es la responsable de la activación del equipo que transmite o recibe los paquetes. Se encarga también de la selección de los canales de frecuencia y de asegurarse que estos no estén ocupados.

El estándar IEEE 802.15.4 ofrece dos tipos de opciones de capa física PHY, que se combinan con la MAC para permitir un amplio rango de aplicaciones en la red. Ambas opciones de la capa PHY se basan en métodos de secuencia directa de espectro expandido (DSSS) que resultan en bajos costos de implementación digital en circuitos integrados y ambas comparten la misma estructura básica de paquetes LOW-DUTY-CYCLE (Bajo ciclo de ocupación) con operaciones de bajo consumo de energía. La principal diferencia entre ambas PHY's radica en las bandas de frecuencia:

- PHY para : 868 – 868.8MHz / 902 - 928MHz
- PHY para: 2400 – 2483.5MHz

La disponibilidad internacional de la banda de los 2.4Ghz ofrece ventajas en términos de mercados más amplios y costos de manufactura más bajos. Por otro lado las bandas de 868 y 915 MHz ofrecen una alternativa a la congestión creciente y demás interferencias (redes WLAN, hornos de microondas, teléfonos inalámbricos, etc.) asociados a la banda de 2.4GHz y mayores rangos por enlace debido a que existen menores pérdidas de propagación.

Existe una segunda distinción de las características de la PHY es el rango de transmisión. La PHY de 2.4GHz permite un rango de transmisión de 250kbps, mientras que la PHY de los 868 / 915MHz ofrece rangos de transmisión de 20kbps y 40kbps respectivamente. Este rango superior de transmisión de la PHY de los 2.4GHz se atribuye principalmente a un mayor orden en la modulación, en la cual cada símbolo representa múltiples bits.

Algunas características globales de la capa física son el control del transceptor radio, calidad del enlace, selección del canal, detección de los niveles de energía recibidos, detección de portadora para su uso a nivel MAC.

### **4.3.2 CAPA DE ACCESO AL MEDIO (MAC)**

Provee la interfaz entre la PHY y la capa de red. Responsable del direccionamiento de los datos salientes y la identificación de la fuente de los datos entrantes. Se encarga del ensamblaje de paquetes de datos (tramas) que se transmiten y el desensamblaje de los paquetes de datos recibidos.

La capa MAC, se encarga del control de acceso al medio y responsable de transmitir los paquetes. También lleva las labores de validar las tramas que recibe, comprobar errores en la transmisión y confirmar la recepción de tramas al emisor.

Otras funciones importantes que cumple son: la fragmentación de paquetes, control de flujo, tasa de transmisión y funciones relacionadas con la gestión de la batería. En resumen se encarga de controlar un medio de comunicación compartido por una serie de dispositivos que se comunican a través de él.

Las restricciones de las redes de sensores, especialmente el ahorro de energía, influyen directamente en el diseño de los protocolos de control de acceso al medio (MAC).

Las funciones del MAC de la IEEE 802.15.4 son:

- Generar BEACONS (guías de red) en el caso de ser un dispositivo coordinador de red y que el resto de nodos se sincronicen al ritmo de los BEACONS.
- Mecanismos de acceso al medio CSMA-CA (CARRIER SENSE MULTIPLE ACCESS WITH COLLISION AVOIDANCE), es decir evita interferencia en las comunicaciones ya que los dispositivos escuchan antes de transmitir.
- Validación de tramas.
- Asociación o disociación a una PAN (PERSONAL AREA NETWORK).
- Funciones de seguridad (encriptación AES<sup>9</sup> de 128 bits)
- Calidad de servicio (QoS) mediante gestión de GTS<sup>10</sup> (GRANTED TIME SLOT)
- Entrega de tramas de confirmación ACK's (ACKNOWLEDGEMENT FRAME)

Para redes WPAN que soportan guías (BEACONS), la sincronización es ejecutada recibiendo y decodificando tramas guía (BEACON FRAMES). Para WPAN que no soportan guías la sincronización se realiza preguntando al coordinador por datos. Las

---

<sup>9</sup> AES (ADVANCED ENCRYPTION STANDARD), es un esquema de cifrado por bloques. Desde 2006, el AES es uno de los algoritmos más populares usados en criptografía simétrica.

<sup>10</sup> GTS (GUARANTEED TIME SLOT), intervalos de tiempo garantizados. Este espacio es reservado para que en caso de haber mucho tráfico, ciertos dispositivos tengan siempre prioridad de utilizarlo para lograr así una mínima latencia

guías BEACONS son usadas principalmente para reducir el consumo de energía del sistema, pues dice a los dispositivos cuando comunicarse entre sí.

En resumen, la capa física PHY trabaja en conjunto con la capa de acceso al medio MAC, para brindar los servicios de transmisión de datos por el aire, punto a punto. Estas dos capas son descritas por el estándar IEEE 802.15.4 como se indico anteriormente. [14]

### 4.3.3 CAPA DE RED (NWK)

La capa de red, provee la configuración de red, manipulación y encaminamiento de mensajes.

Es la interfaz entre la MAC y la capa de aplicación. Responsable de la inicialización de la red y la configuración de entrada y salida a la misma. Configura los dispositivos nuevos que se unen a la red. Distribuye las direcciones, desde el Coordinador, a los dispositivos que integran la red. Su principal función es la del direccionamiento de las tramas de datos hacia el destino preciso. Además, proporciona los medios para garantizar la entrega del paquete al destinatario final, filtra los paquetes recibidos, los cifra y los autentifica.

La capa de red soporta múltiples topologías de red incluyendo: estrella, árbol y malla, como se muestra en la figura 4.3.

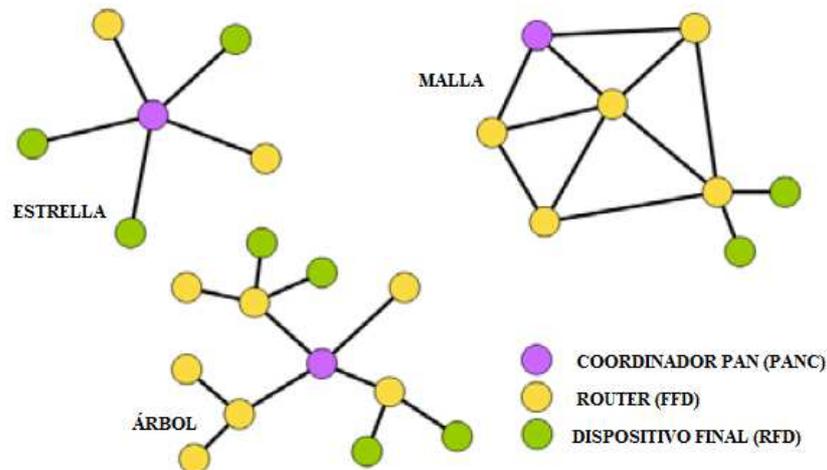


Figura 4.3: Topología de red ZIGBEE

En la **TOPOLOGÍA ESTRELLA** uno de los dispositivos asume el papel de COORDINADOR de red. Es responsable de iniciar y mantener los dispositivos en la red. Todos los otros dispositivos son conocidos como puntos de red (END DEVICES), se comunican directamente con el coordinador.

En la **TOPOLOGÍA MALLA**, se permiten continuas conexiones y re-configuraciones, “saltando” de un nodo a otro hasta que una conexión pueda ser

establecida. Las redes tipo malla se auto restablecen, esto quiere decir que la red puede seguir operando aun cuando un nodo se dañe o la conexión sea mala. Como resultado se crea una red muy confiable.

En la **TOPOLOGÍA ÁRBOL**, un COORDINADOR establece inicialmente la red, los ENRUTADORES forman las ramas al encargarse de la entrega de los mensajes, y los DISPOSITIVOS TERMINALES constituyen las hojas. [13]

#### **4.3.4 CAPA DE APLICACION (APL)**

La capa de aplicación provee las funciones que se quiere implementar en los dispositivos.

Esta capa está constituida por tres secciones principales: el soporte a la aplicación (APS), los objetos-dispositivos de ZIGBEE (ZDO) y las funciones definidas por la empresa que desarrolló el dispositivo.

El APS es responsable de mantener tablas para ligar y enviar mensajes entre dispositivos asociados. Es el encargado del proceso BINDING (ligar), que es la habilidad de unir dos dispositivos basados en sus servicios y sus necesidades. La capa es también responsable de descubrir otros dispositivos que operan en el área local.

El ZDO define la función del dispositivo en la red ZIGBEE (Coordinador de red, dispositivo de red). El dispositivo objeto ZIGBEE es también responsable de iniciar y responder peticiones de unión a una red.

Los objetos de aplicación son definidos por el fabricante que implementa la aplicación. La pila de protocolo ZIGBEE soporta arriba de 30 distintas aplicaciones implementadas al mismo tiempo. [13]

#### **4.4 CANALIZACIÓN**

En el IEEE 802.15.4 se definen 27 canales de frecuencias entre las tres bandas (figura 4.4).

- La PHY de los 868/915 utiliza 11 canales: un solo canal entre 860 – 868MHz y diez canales entre los 902 - 928MHz. Debido al soporte regional de esas dos bandas de frecuencias, es muy improbable que una sola red utilice los 11 canales. Sin embargo, las dos bandas se consideran o suficientemente cercanas en frecuencias que se puede utilizar el mismo hardware para ambos y así reducir los costos de manufactura.
- La PHY de los 2.4GHz soporta 16 canales de 2MHz entre los 2.4 y los 2.4835GHz con un amplio espacio entre canales (5MHz) y esto con el objetivo de facilitar los requerimientos de filtrado en la transmisión y en la recepción (Figura 4.5).

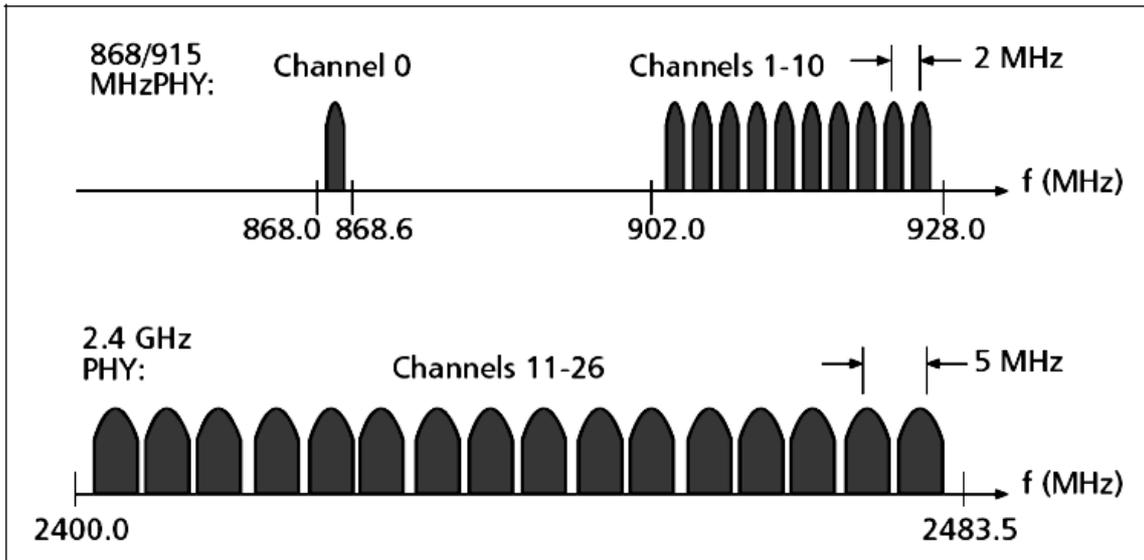


Figura 4.4: Estructura de canales. Estándar IEEE 802.15.4

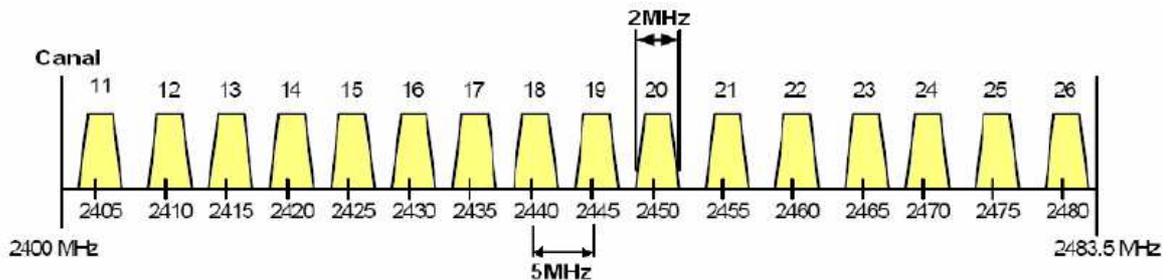


Figura 4.5: Canalización de la banda 2.4GHz.

En la tabla 4.2, se indica la frecuencia central de cada uno de los 26 canales.

Tabla 4.2: Frecuencia central de canal

NÚMERO DE CANALES	FRECUENCIA CENTRAL (MHz)
K=0	868.3
K=1, 2, ... 10	$906 + 2(K-1)$
K=11, 12, ... 26	$2405 + 5(K-11)$

Dado que el hogar es propenso a tener múltiples redes inalámbricas trabajando en las mismas bandas de frecuencias, así como una interferencia no intencionada de las diferentes aplicaciones, la capacidad de re-localización dentro del espectro será un factor importante en el éxito de la red inalámbrica implementada con ZIGBEE.

Los dispositivos que operan en la banda de los 2.4GHz pueden recibir interferencias causadas por otros servicios que operan en dicha banda. Esta situación es aceptable en las aplicaciones que utilizan el estándar IEEE 802.15.4, las cuales requieren una baja calidad de servicio (QoS), no requieren comunicación asíncrona y se espera que realice varios intentos para completar la transmisión de paquetes. [12]

## **4.5 FORMACIÓN DE LA RED ZIGBEE**

Una nueva red ZIGBEE es establecida por un coordinador. Al inicializarse, el coordinador busca otros coordinadores en sus canales permitidos. Basado en la energía del canal y el número de redes encontradas en sus canales, establece su propia red y selecciona un identificador PAN único de 16 bits. Una vez que la nueva red ha sido establecida, los enrutadores y terminales son habilitados a unirse a red. En caso de conflictos por PAN ID repetidos en diferentes coordinaciones, se efectúa un procedimiento de resolución que cambiará en uno de los coordinadores su identificador.

Los distintos dispositivos guardan información a cerca de otros nodos de la red, en un área no volátil de memoria llamada tabla de vecindades. Al inicializarse, si un dispositivo determina a través de la tabla que fue parte de una red, puede efectuar un procedimiento de notificación para localizarla. Los dispositivos (coordinadores o enrutadores) que reciban notificación, verificarán sus tablas para cerciorarse de que el nuevo dispositivo pertenecía a su red. Si la notificación falla o el dispositivo no se encuentra en la tabla de vecindades del resto, tratará de unirse a una de las redes como un nuevo dispositivo.

Una vez en la red, un dispositivo puede desasociarse ya sea por pedido del coordinador o router (dispositivos padres) o por sí mismo.

## **4.6 CONSUMO DE ENERGÍA**

ZIGBEE se ha diseñado con la idea del bajo consumo de energía. Hay muchas características que ayudan a reducir el consumo de poder. Primero está la tasa de datos. En contraste con WIFI y BLUETOOTH, ZIGBEE no está enviando e-mails, documentos grandes, audio, video, etc.

Cuando se realiza redes inalámbricas para lecturas de datos de sensores, estos tienen típicamente unas pocas decenas de bytes, no requieren un ancho de banda alto y el ancho de banda bajo de ZIGBEE lo ayuda a lograr las metas de bajo consumo de energía, bajo costo y robustez.

Debido a los requerimientos de las aplicaciones de ZIGBEE de bajo ancho de banda, un nodo ZIGBEE duerme la mayoría del tiempo ahorrando la energía de la batería, se despierta y envía datos rápidamente y regresa a dormir nuevamente.

Incluso los nodos en STAND-BY pueden lograr una latencia adecuadamente baja, porque ZIGBEE puede pasar del modo inactivo al modo activo en 15mseg o menos. En contraste, con los retrasos de WAKE UP para BLUETOOTH que están típicamente alrededor de los 3 segundos.

Para ahorrar tanta energía como sea posible, ZIGBEE puede emplear una estrategia de comunicación “hablar cuando esté lista”, simplemente enviando los datos cuando se tenga datos listos para enviar y luego esperar confirmación de (ACK). Si no se consigue ACK, significa que se perdieron los datos, así que se envía el paquete de nuevo. Sin

embargo, esto no siempre es verdad. En una red de miles de sensores diminutos, los números grandes de colisiones de paquetes y retransmisiones podrían gastar la energía y acortar significativamente la vida de la batería del nodo sensor.

# **CAPÍTULO V**

## **Subsistema de comunicación remota**

## 5.1 ELEMENTOS DE UN NODO ZIGBEE

Un nodo ZIGBEE típico (figura 5.1) consta de:

- Módulo de sensores: posee los sensores o los actuadores que serán manejados por las entradas y salidas del microcontrolador.
- Módulo de control: formado por un microcontrolador, encargado de controlar todas las funciones del dispositivo.
- Módulo de comunicaciones: formado por un transceptor de RF, que realiza la transmisión y la recepción de información.
- Módulo de potencia: contiene la fuente de energía.

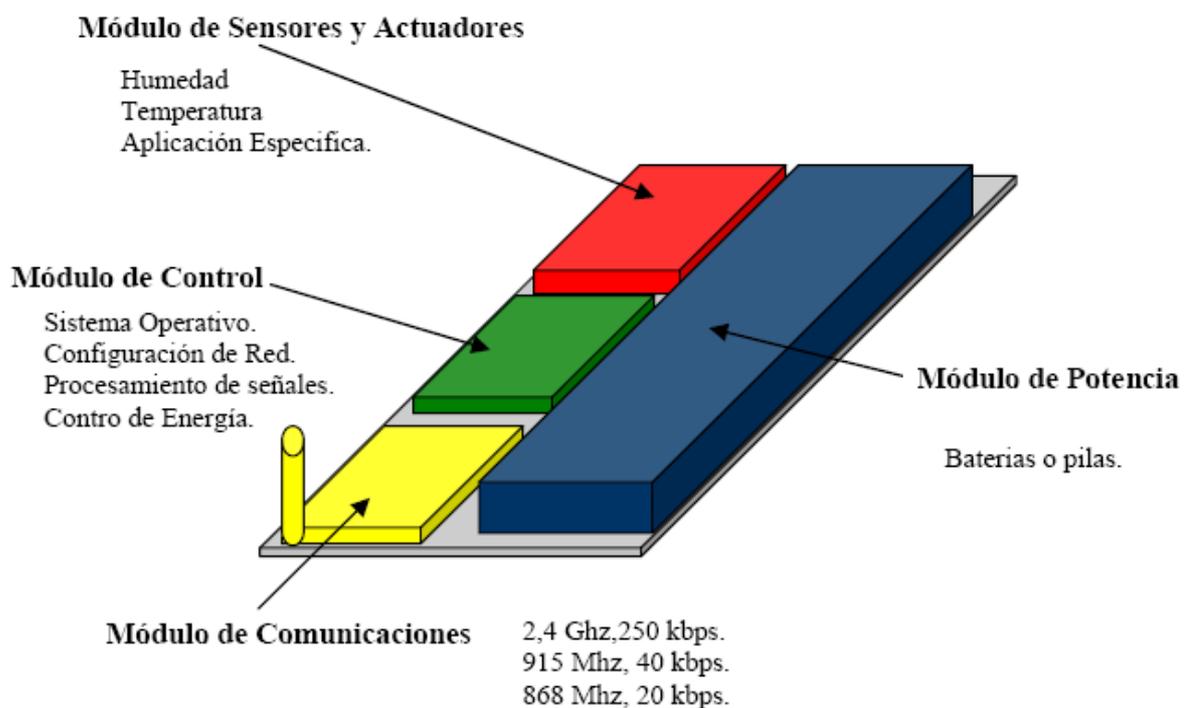


Figura 5.1: Diagrama de bloques de un nodo ZIGBEE

Los nodos ZIGBEE implementados para el desarrollo de este proyecto (figura 5.2) incluyen:

- Una parte con un circuito integrado de radio frecuencia RF, en este caso se utilizó el módulo XBEE DIGI-MESH 2.R4 RF de MAXSTREAM, el que contiene una pequeña parte de la capa física (PHY).
- Un microcontrolador que se encarga del procesamiento y de la conexión con otros periféricos como los sensores y la fuente de energía (PIC16F88 del NODO SENSOR).
- Para la conexión con el PC encargado de manejar la interfaz gráfica HMI se aplica otro microcontrolador PIC18F2550 (NODO COORDINADOR)

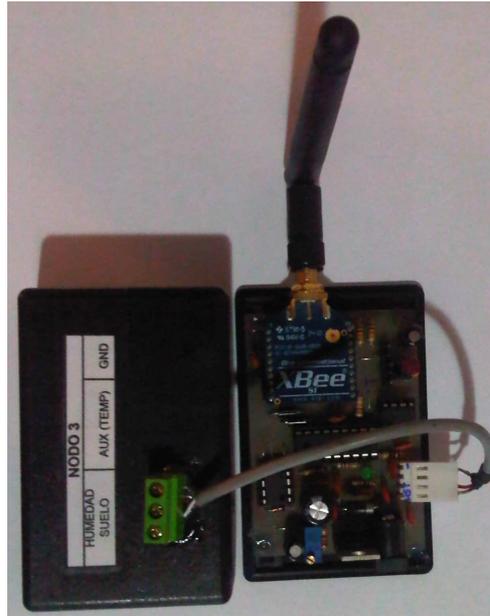


Figura 5.2: Aspecto físico de los NODOS ZIGBEE implementados en el sistema

## 5.2 MODULO ZIGBEE XBEE DIGI-MESH 2.4 RF [16]

Los transeceptor de radiofrecuencia ZIGBEE, mostrados en el diagrama de bloques de la figura 1.2, tienen como tarea principal la transmisión y recepción de datos que son suministrados por los microcontroladores.

Para el sistema implementado, se utilizó los módulos ZIGBEE XBEE DIGI-MESH 2.4 RF, que son módulos de radio frecuencia que trabajan a 2.4 GHz con protocolo de comunicación 802.5.4, y fabricados por la compañía estadounidense MAXSTREAM<sup>11</sup>.

Son utilizados en automatización de casas, sistemas de seguridad, monitoreo de sistemas remotos, aparatos domésticos, alarmas contra incendio, plantas tratadoras de agua, etc.

Los módulos XBEE DIGI – MESH 2.4 RF tienen un alcance en interiores de hasta 30m, y en exteriores el alcance es de hasta 90m, la figura 5.3, muestra el aspecto físico de los módulos utilizados.



Figura 5.3: Módulo ZIGBEE XBEE DIGI – MESH 2.4 RF

<sup>11</sup> Sitio oficial: <http://www.digi.com>

La tabla 5.1 muestra las principales características de este módulo:

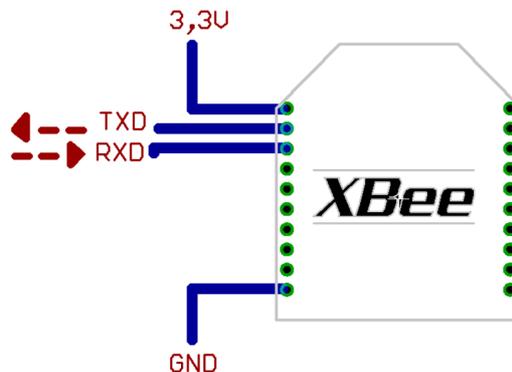
**Tabla 5.1: Características técnicas módulo XBEE DIGI – MESH 2.4 RF**

CARACTERÍSTICA	VALOR
Tasa de transmisión RF	250kbps
Alcance en interiores	30m
Alcance en exteriores	90m
Sensibilidad de recepción	-92dBm
Potencia de transmisión	1mW (+ 0dBm)
Interfaz de datos SERIAL	3.3V CMOS serial UART
Modos de configuración	API o por comandos AT
Banda de frecuencia	2.4GHz ISM
Tasa de transmisión SERIAL	115.2kbps
Datos para configuración de red	PAN ID, canal, dirección (64 bits)
Número de canales	16 canales en Secuencia Directa
Tensión de alimentación	2.8 – 3.4 Vcd
Corriente TX (Out)	45mA a 3.3V
Corriente RX (In)	50mA a 3.3V
Temperatura de operación	- 40 a 85°C
Número de pines	20
Topologías de red soportadas	Punto a punto, punto a multipunto y malla
Potencia en modo de “sueño”	Menor a 10uA
Agencias que lo aprueban	FF (Estados Unidos), IC (Canadá), ETSI (Europa)

Entre las necesidades que satisfacen estos módulos, podemos citar:

- Bajo costo.
- Ultra – bajo consumo de potencia.
- Uso de bandas de radio libres y sin necesidad de licencias.
- Instalación barata y simple.
- Redes flexibles y extensibles.

La figura 5.4 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 5.4: Circuito básico de funcionamiento del XBEE**

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

## **5.3 CONFIGURACIÓN DE LOS MÓDULOS XBEE DIGI-MESH 2.4 RF [16]**

### **5.3.1 MODOS DE CONFIGURACIÓN**

Los modos de configuración que maneja este módulo son: por comandos AT y API.

**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 alguna herramienta como puede ser: el HYPERTERMINAL<sup>12</sup> de Windows, el programa X-CTU<sup>13</sup> o algún microcontrolador que maneje UART y tenga los comandos guardados en memoria o los adquiriera de alguna otra forma.

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 posteriormente esperar otro tiempo GT. Como respuesta el módulo entregará un OK.

El módulo XBEE viene por defecto con una velocidad de 9600bps. 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.

**MODO API:** Este modo es más complejo, pero permite el uso de FRAMES 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).

---

<sup>12</sup> HYPERTERMINAL de Windows es software de comunicaciones utilizado para conectarse a otros equipos a través de módem, o vía serie RS-232. Se puede descargar de forma gratuita.

<sup>13</sup> XCU software propios de MAXSTREAM creado para configurar los módulos XBEE. Se puede descargar de forma gratuita:  
<http://www.digi.com/support/productdetail?pid=3352&osvid=57&type=cabling>

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.

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, 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 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.

En módulo XBEE viene por defecto en un modo de operación definido como transparente, que se describe a continuación:

## **MODO TRANSPARENTE:**

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.

El comando RO se define de Packetization Timeout, lee el número de caracteres o retardos entre caracteres, necesarios antes de la transmisión. Si el valor del parámetro está en cero, se transmitirán los datos apenas lleguen al búfer

La figura 5.5 muestra el diagrama de bloques interno del módulo cuando trabaja en este modo de operación:

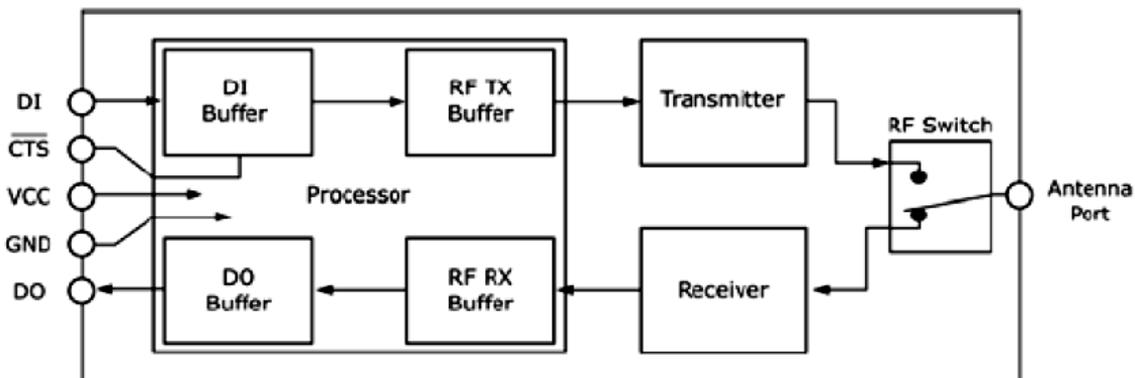


Figura 5.5: Flujo interno de datos del módulo XBEE

**Búfer DI (*Data In*):** Cuando los datos seriales ingresan al dispositivo RF a través del pin DI (pin 3), los mismos son almacenados en el búfer DI hasta que puedan ser procesados.

**Control de Flujo por hardware (*CTS, Clear To Send*):** Cuando el búfer DI se encuentra a 17 bytes de quedar completamente lleno, el módulo XBEE envía una señal CTS (pone en alto la línea) para indicarle al host que suspenda la transmisión de datos; una vez que se dispone de 34 bytes de memoria libres, el dispositivo limpia la señal CTS. Existen dos maneras de evitar el control de flujo:

- Enviando mensajes más pequeños que el tamaño del búfer DI.
- Trabajando a una velocidad de transmisión serial más baja que la velocidad de transmisión del módulo.

**Búfer DO (*Data Out*):** Cuando se reciben datos RF, éstos ingresan al búfer DO para luego ser enviados vía serial hacia el host. Una vez que el búfer ha completado su capacidad, todos los datos RF recibidos se perderán.

**Control de flujo por hardware (*RTS, Ready To Send*):** Si la opción RTS se encuentra habilitada para el control de flujo, (pin 6 del módulo XBEE) los datos no serán transmitidos fuera del búfer DO hasta que RTS sea deshabilitado. Existen dos posibles causas en las cuales el búfer DO podría empezar a llenarse y causar una pérdida de datos:

- Si la velocidad de transmisión RF es más alta que la velocidad del interfaz de datos del módulo, en este caso, el dispositivo recibirá los datos del módulo transmisor más rápido que el envío de datos hacia el host.

- Si el host no permite al módulo que éste le transmita datos desde el búfer DO, esto porque ha comenzado el control de flujo vía software o hardware.

### 5.3.2 PROCESO DE CONFIGURACIÓN

En este trabajo se realizó la configuración inicial de los módulos a través del modo COMANDO AT y utilizando como software de configuración el HYPERTERMINAL de Windows, el procedimiento realizado se explica a continuación:

Para lograr la comunicación entre el módulo XBEE y el computador en el que se realiza las configuraciones, se utilizó el circuito convertor MAX-232 [15] que transforma las señales digitales de voltajes TTL a valores aceptados por la interfaz RS-232, como se observa en la figura 5.6.

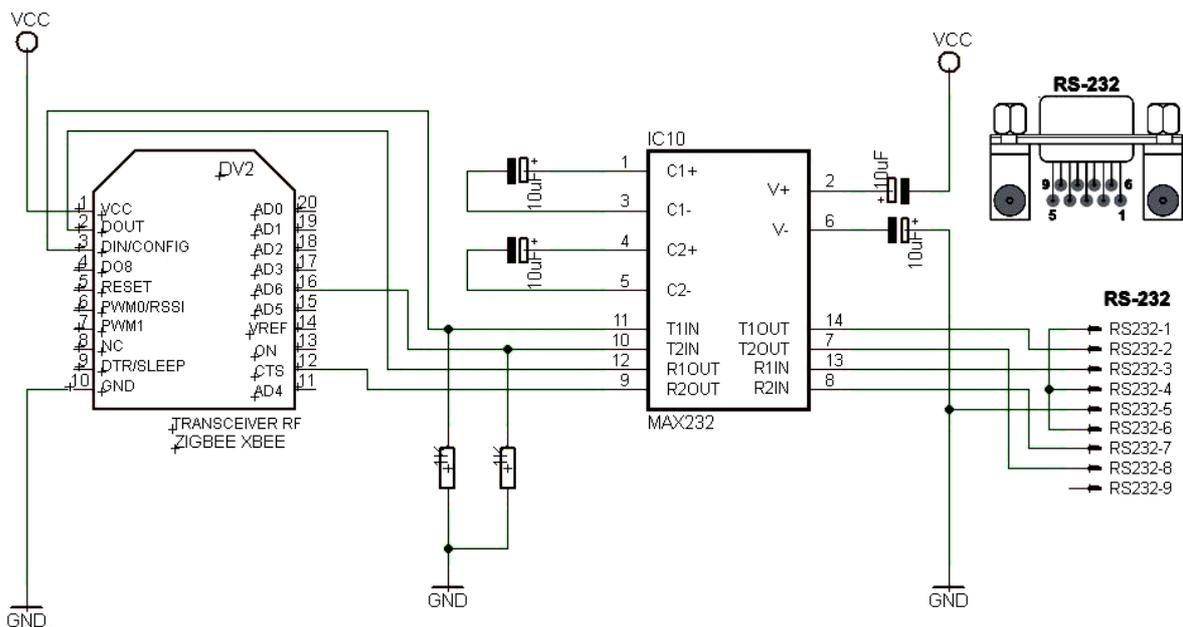


Figura 5.6: Conexión del convertor MAX232

Una vez que físicamente se ha enlazado el módulo XBEE con el PC, configuramos el HYPERTERMINAL de la siguiente manera:

- Abrir el HYPERTERMINAL de Windows: para Windows XP y versiones anteriores, éste programa viene cargado por defecto y se encuentra mediante la siguiente ruta: Inicio >> Todos los programas >> Accesorios >> Comunicaciones >> HyperTerminal, los sistemas operativos actuales como WINDOWS7, no llevan incorporado este software de comunicaciones, por lo que en ese caso, es necesario descargarlo<sup>14</sup>).

<sup>14</sup> Link de descarga de HYPERTERMINAL:

[http://www.pic16f84a.org/component/docman/doc\\_download/37-hyperterminal.html](http://www.pic16f84a.org/component/docman/doc_download/37-hyperterminal.html)

- En la ventana de DESCRIPCIÓN DE LA CONEXIÓN, se selecciona un icono y se asigna un nombre a la conexión del HyperTerminal creada (Figura 5.7).



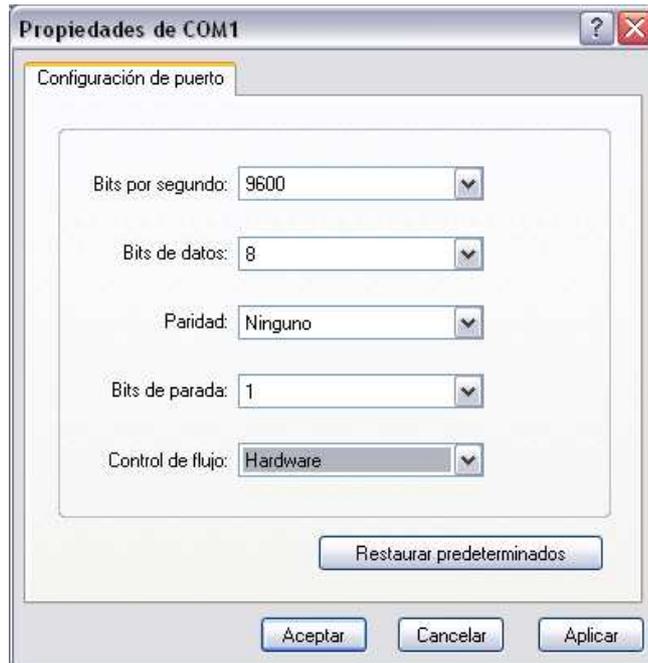
**Figura 5.7. Configuración HyperTerminal. DESCRIPCIÓN DE LA CONEXIÓN**

- En la ventana CONECTAR A, se elige el puerto de comunicaciones en el que se va a realizar la conexión. En este caso es COM1 (Figura 5.8)



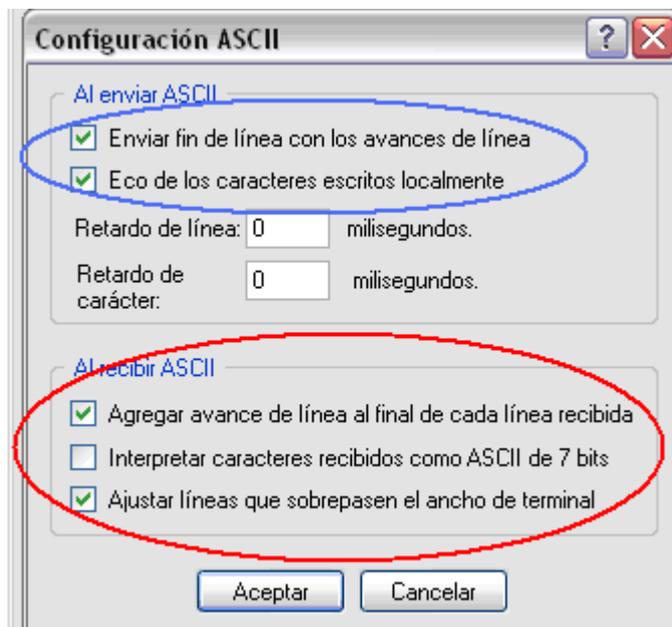
**Figura 5.8: Configuración HyperTerminal. SELECCIÓN DEL PUERTO**

- En la pantalla PROPIEDADES DE COM1 (figura 5.9), se elige los siguientes parámetros:
  - Bits por segundo: 9600bps (Velocidad con la que viene configurada por defecto en el módulo XBEE). Se elige mantener ésta velocidad de transmisión pues se considera suficiente y adecuada para el sistema que se está implementado pues las variables no son monitoreadas en tiempo real.
  - Bits de datos: 8
  - Paridas: Ningún bit
  - Bit de parada: 1
  - Control de flujo: Por hardware



**Figura 5.9: Configuración HyperTerminal. CONFIGURACIÓN DEL PUERTO**

- Se abre la pantalla del Hyperterminal, finalmente para que podamos empezar la programación con comandos AT, se realiza las siguientes acciones:
  - En la barra de menú de HyperTerminal seguir la ruta: Archivo >> Propiedades >> Configuración >> Configuración ASCII >> activar las opciones que se muestran en la figura 5.10.



**Figura 5.10. Configuración HyperTerminal. ASCII.**

Ahora es posible ingresar comandos AT en el HyperTerminal para las configuraciones iniciales de cada módulo.

En la tabla 5.2, se describe los comandos AT que fueron utilizados para la configuración y gestión de la red implementada:

**Tabla 5.2: Comando AT de configuración y gestión de NODOS**

AT	DESCRIPCIÓN
+++	Ingreso al modo de comando AT <sup>15</sup>
WR	Escribe todos los parámetros configurados en la memoria no volátil del módulo. Una vez que se envía este caracter, no es posible enviar otro comando AT hasta recibir respuesta de confirmación (OK) del módulo
RE	Restaura los parámetros de los módulos a los valores por defecto
FR	Realiza un reset profundo del módulo y responde con OK (tarda aproximadamente 100ms)
CN	Sale del modo de comando AT
GT	Determina el período de silencio antes y después de una secuencia de comandos AT
SL	32 bits menos significativos del número serial del módulo (Valor de fábrica)
SH	32 bits más significativos del número serial del número <sup>16</sup> (Valor de fábrica)
DL	32 bits menos significativos de la dirección del destino
DH	32 bits más significativos de la dirección del destino
ID	PAN ID (Identificador de red)
CH	Establece el canal por el cual se realizará la conexión RF entre módulos (Ver tabla 5.3 de frecuencia de canales para la configuración de este parámetro)
PL	Selecciona o lee el nivel de potencia con el cual el módulo transmite los datos (Ver tabla 5.4 de los rangos de potencia de transmisión disponibles)
CE	Indica el comportamiento del módulo: 0 para DISPOSITIVO FINAL y 1 para COORDINADOR
BD	Define o lee el datos de la velocidad de la interfaz serial para las comunicaciones, entre el puerto serial del módulo y el host (Ver tabla 5.5 de los valores de velocidades disponibles)
RO	Define e lee el número de retardos entre caracteres, necesarios antes de la transmisión. Si el valor del parámetro está fijado en cero, se transmiten los datos a penas lleguen al búfer
ND	Reporta todos los dispositivos que se encuentren en el mismo canal y en la misma PAN ID que el módulo. El formato de respuesta al enviar este módulo es el siguiente: SH, SL, DB
NI	Identificador de nodo (Define mediante un STRING el nodo o módulo)
IU	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 la fecha de compilación de la aplicación, MAC, PHY y versión de BOOTLOADER y sus fechas de compilación
VR	Indica que versión de FIRMWARE se encuentra actualmente en el módulo

<sup>15</sup> Si después de algunos segundos de haber ingresado al modo AT, no se escribe ningún comando, HyperTerminal sale automáticamente del modo Comando y deja de reconocer instrucciones AT.

<sup>16</sup> SH y SL son datos que vienen especificados en la parte trasera del módulo XBEE

**Tabla 5.3: Canales de frecuencia y su comando AT**

Canal	Héxadecim al	Frecuencia [GHz]			Comando AT
		Inferior	Central	Superior	
11	0x0B	2,4025	2,4050	2,4075	ATCH0B
12	0x0C	2,4075	2,4100	2,4125	ATCH0C
13	0x0D	2,4125	2,4150	2,4175	ATCH0D
14	0x0E	2,4175	2,4200	2,4225	ATCH0E
15	0x0F	2,4225	2,4250	2,4275	ATCH0F
16	0x10	2,4275	2,4300	2,4325	ATCH10
17	0x11	2,4325	2,4350	2,4375	ATCH11
18	0x12	2,4375	2,4400	2,4425	ATCH12
19	0x13	2,4425	2,4450	2,4475	ATCH13
20	0x14	2,4475	2,4500	2,4525	ATCH14
21	0x15	2,4525	2,4550	2,4575	ATCH15
22	0x16	2,4575	2,4600	2,4625	ATCH16
23	0x17	2,4625	2,4650	2,4675	ATCH17
24	0x18	2,4675	2,4700	2,4725	ATCH18
25	0x19	2,4725	2,4750	2,4775	ATCH19
26	0x1A	2,4775	2,4800	2,4825	ATCH1A
<b>Frecuencia Base</b>		<b>2.405 GHz</b>			

**Tabla 5.4: Rangos de potencia de transmisión configurables**

COMANDO AT	Rango de potencia seleccionado
PL 00	-10 a 10dBm
PL 01	-6 a 12dBm
PL 02	-4 a 14dBm
PL 03	-2 a 16dBm
PL 04	0 a 18dBm

**Tabla 5.5: Valores de velocidad de transmisión configurables**

COMANDO AT	Velocidad de la interfaz serial seleccionada
BD 00	1200bps
BD 01	2400bps
BD 02	4800bps
BD 03	9600bps
BD 04	1920bps
BD 05	38400bps
BD 06	57600bps
BD 07	115200bps

Para poder comunicar los módulos, todos deben cumplir con los siguientes requerimientos:

- Estar en el mismo grupo de red (PAN ID).
- Trabajar en el mismo canal (CH).
- Trabajar a la misma velocidad de transmisión (BD)
- Establecer correctamente la dirección de origen (SH y SL), y la dirección destino (DH y DL ).

En función de esto, se ha desarrollado la tabla 5.6 con los parámetros a ser configurados inicialmente en cada nodo que forma parte de la red ZIGBEE implementada (Ver figura 1.2).

**Tabla 5.6: Parámetros configurados en la red implementada**

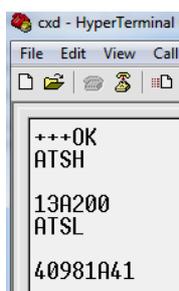
PARÁMETRO	NODO SENSOR 1	NODO SENSOR 2	NODO SENSOR 3	NODO COORDINADOR
Serial alto (ATSH)	0013A200	0013A200	0013A200	0013A200
Serial bajo (ATSL)	40691436	40691439	40981A41	4069143D
Destino alto (ATDH)	0013A200	0013A200	0013A200	No son valores fijos
Destino bajo (ATDL)	4069143D	4069143D	4069143D	
Canal (ATCH)	17	17	17	17
Identificador de red PAN (ATID)	1111	1111	1111	1111
Velocidad TX (ATBD)	3	3	3	3
Rol del nodo (ATCE)	0	0	0	1
Identificador de nodo (ATNI)	NODE_1	NODE_2	NODE_3	BRIDGE USB_ZIGBEE
Potencia de transmisión (ATPL)	4	4	4	4

Las direcciones de destino DH y DL del coordinador no se especifican en la tabla anterior, ya que el sistema de monitoreo, está diseñado para que a través del programa desarrollado en el microcontrolador del nodo coordinador se envíe periódicamente a cada nodo sensor una petición de envío de datos de las variables medidas, es decir será el microcontrolador a través de varias funciones detalladas más adelante, el encargo en escribir en cada módulo ZIGBEE del nodo sensor la dirección destino (alta DH y baja DL) cada vez que desee realizar una petición de datos.

El canal 17, en función de lo indicado en la tabla 5.3, corresponde al canal número 23 cuya frecuencia central es de 2.465Ghz, en la que se tuvo mejor respuesta del módulo en lo relacionado a la reducción de interferencias.

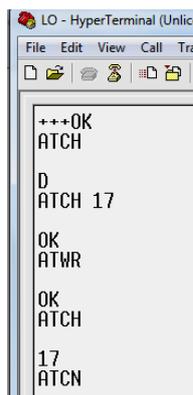
A continuación se describe algunos ejemplos de cómo fueron configurados los parámetros de la tabla 5.6, a través de HyperTerminal.

- Para visualizar las direcciones SH y SL de cada módulo, y comprobar con los seriales que vienen impresos en cada módulo, se procede a ingresar comandos AT en el HyperTerminal, como se muestra en la figura 5.11.



**Figura 5.11: Verificación de direcciones SH y SL (Seriales)**

- Para configurar el valor del canal CH, en cada módulo se procede a ingresar comandos AT en el HyperTerminal como se indica en la figura 5.12.



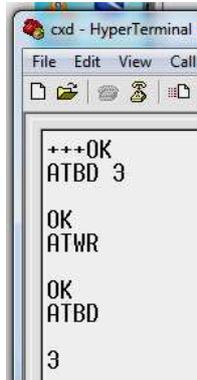
**Figura 5.12: Configuración del canal de comunicación**

- Para configurar el valor de identificador de red PAN ID, en cada módulo se procede a ingresar comandos AT en el HyperTerminal como se indica en la figura 5.13.



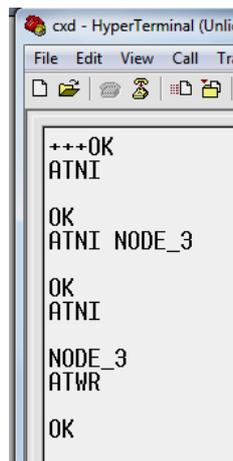
**Figura 5.13: Configuración del identificador de red PAN ID**

- Para configurar el valor de la velocidad de transmisión de 9600bps, en cada módulo se procede a ingresar comandos AT en el HyperTerminal como se indica en la figura 5.14.



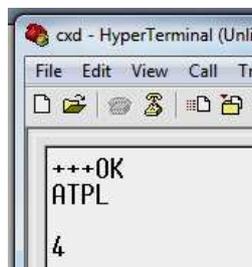
**Figura 5.14: Configuración de la velocidad de transmisión BD**

- Para configurar el nombre de los nodos creados NI, en cada módulo se procede a ingresar comandos AT en el HyperTerminal como se indica en la figura 5.15.



**Figura 5.15: Configuración del nombre de nodo NI.**

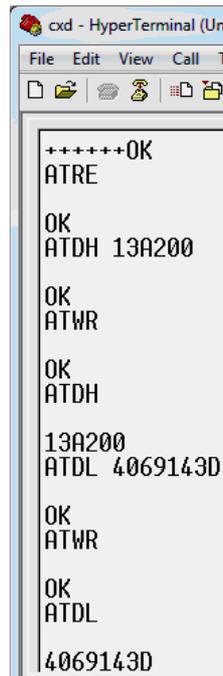
- Para configurar el rango de la potencia de transmisión PL, en cada módulo se procede a ingresar comandos AT en el HyperTerminal como se indica en la figura 5.16.



**Figura 5.16: Configuración del rango de potencia de transmisión PL.**

- Para el envío de datos entre los módulos se debe especificar las direcciones de destino ATDL (32 bits bajos de la dirección destino) y ATDH (32 bits altos de dirección)

destino). Esta configuración se la realizó únicamente en los tres NODOS SENSORES cuyas direcciones de destino para cada uno de ellos son las del NODO COORDINADOR (Figura 5.17).



```
cxid - HyperTerminal (Un
File Edit View Call T
*****OK
ATRE
OK
ATDH 13A200
OK
ATWR
OK
ATDH
13A200
ATDL 4069143D
OK
ATWR
OK
ATDL
4069143D
```

Figura 5.17: Configuración de las direcciones de destino DH y DL

En el caso del NODO COORDINADOR, como ya se dijo anteriormente es el microcontrolador indicado en el apartado 5.5 es el encargado de esta tarea cuando esté en funcionamiento el sistema de monitoreo.

#### 5.4 DIAGRAMAS DE CONEXIONADO DE LOS MÓDULOS XBEE

Los módulos XBEE, se encuentran conectados directamente con un microcontrolador, a través del puerto UART, el tipo de comunicación que se maneja entre estos dos dispositivos es Asíncrona, debido a que no utilizan ningún pin adicional para la señal de reloj y el sincronismo se configura internamente en cada equipo. En este tipo de comunicación solo se maneja dos terminales uno para recepción RX y otro para transmisión TX. El requisito fundamental para que este tipo de comunicación funcione es que ambos equipos estén configurados al mismo BITRATE (Tasa de transmisión) que para este caso es de 9600bps.

El diagrama de conexionado del módulo ZIGBEE para cualquiera de los nodos sensores es el mismo y se muestra en las figuras 5.18 y 5.19.

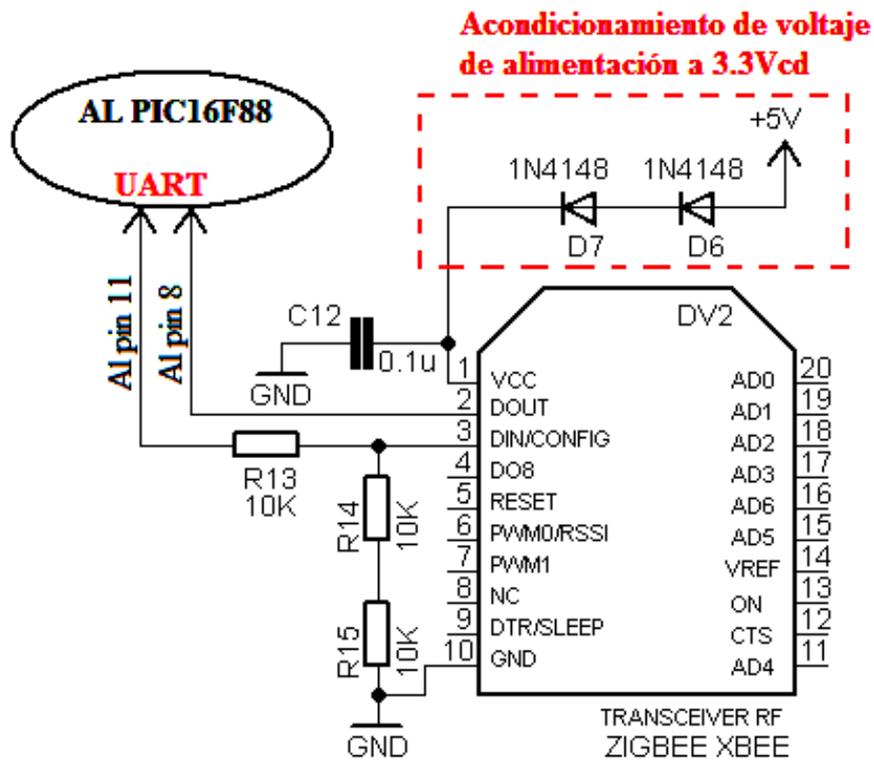


Figura 5.18: Conexión del módulo ZIGBEE para los NODOS SENSORES

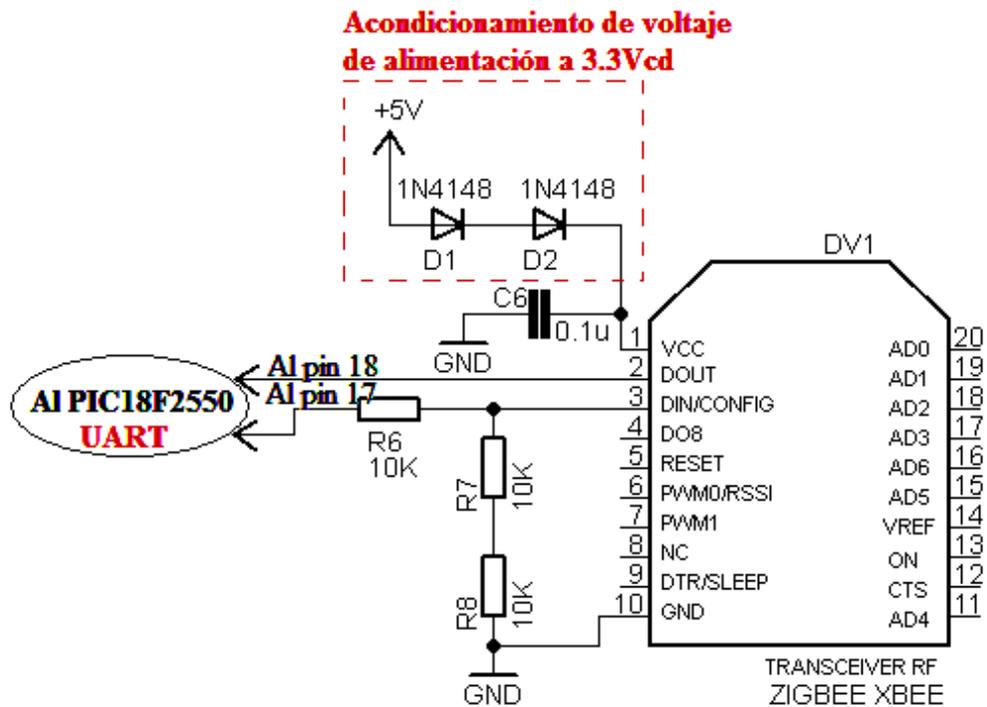


Figura 5.19: Conexión del módulo ZIGBEE para los NODO COORDINADOR

## 5.5 SELECCIÓN DEL MICROCONTROLADOR DEL NODO COORDINADOR

El NODO COORDINADOR está formado por: un microcontrolador y un módulo ZIGBEE.

El microcontrolador se comunica vía UART con el módulo XBEE para:

- Enviar comandos AT de configuración periódica y secuencial de las direcciones de destino DH y DL de cada uno de los NODOS SENSORES.
- Recibir los datos que provienen de los tres NODOS SENSORES y empaquetarlos

El microcontrolador también se comunica con el computador encargado de gestionar la interfaz HMI, vía USB, para enviar las tramas empaquetadas que contienen la información de las variables captadas por los nodos sensores.

Por lo tanto, el microcontrolador que se seleccione como características indispensables debe incluir la opción de manejo de comunicaciones vía puerto UART y vía USB.

En función de lo indicado, se decidió trabajar con el microcontrolador PIC18F2550, el mismo que entre las características más relevantes por las que se decidió emplear en este sistema tenemos:

- Tecnología NANO WATT (Bajo consumo de corriente)
- Comunicación vía UART Asíncrono.
- Comunicación vía USB.
- Rango de voltaje de 4.2 – 5.5V
- Facilidad de conseguirlo en el medio.
- Programación sencilla.
- Bajo costo.

El **PIC18F2550** es un microcontrolador de la familia PIC, fabricada por la empresa Microchip. Posee una arquitectura de 28 pines, y un set de instrucciones RISC<sup>17</sup> muy amigable para memorizar y fácil de entender, sus principales características son:

- Modulo USB V2.0, soportando alta velocidad (12Mb/s), y baja velocidad (1.5Mb/s).
- Comunicación asíncrona USART en SPI 3 Hilos o I2C en 2 hilos
- Oscilador interno desde 32KHz hasta 8MHz.
- Oscilador externo de 48MHZ.
- 32KBytes de memoria Flash.
- 16385 palabras de instrucciones.
- 2KBytes de memoria RAM.
- 256 Bytes de memoria EEPROM.

---

<sup>17</sup> REDUCED INSTRUCTION SET COMPUTER - Computadora con Conjunto de Instrucciones Reducido. Tipo de arquitecturas de computadoras que promueve conjuntos pequeños y simples de instrucciones que pueden tomar poco tiempo para ejecutarse.

- Conexión USART, I2C.
- 10 canales de ADC de 10bits de resolución.
- 4 temporizadores (1 x 8bits y 3 x 16bits).
- 2 salidas PWM.
- Programación en circuito (ICSP).
- Niveles de prioridad de interrupciones.
- 12 MIPS [17]

Para que el módulo USB que lleva incorporado el microcontrolador pueda enlazarse con cualquier software, en este caso con LABVIEW, es necesario instalar en el CPU la librería DLL MCHPFSUSB de la MICROCHIP<sup>18</sup>, que se explicará en el apartado 5.8.

## **5.6 DIAGRAMA DE CONEXIÓN DEL MICROCONTROLADOR PIC18F2550**

En la figura 5.20, se muestra el conexionado realizado al PIC18F2550, del nodo COORDINADOR.

La tabla 5.7, resumen la función que desempeña cada pin utilizado en el microcontrolador PIC18F2250.

---

<sup>18</sup> Sitio de descarga de la librería:  
[http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/MCHPFSUSB\\_Setup\\_v1.3.exe](http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/MCHPFSUSB_Setup_v1.3.exe)

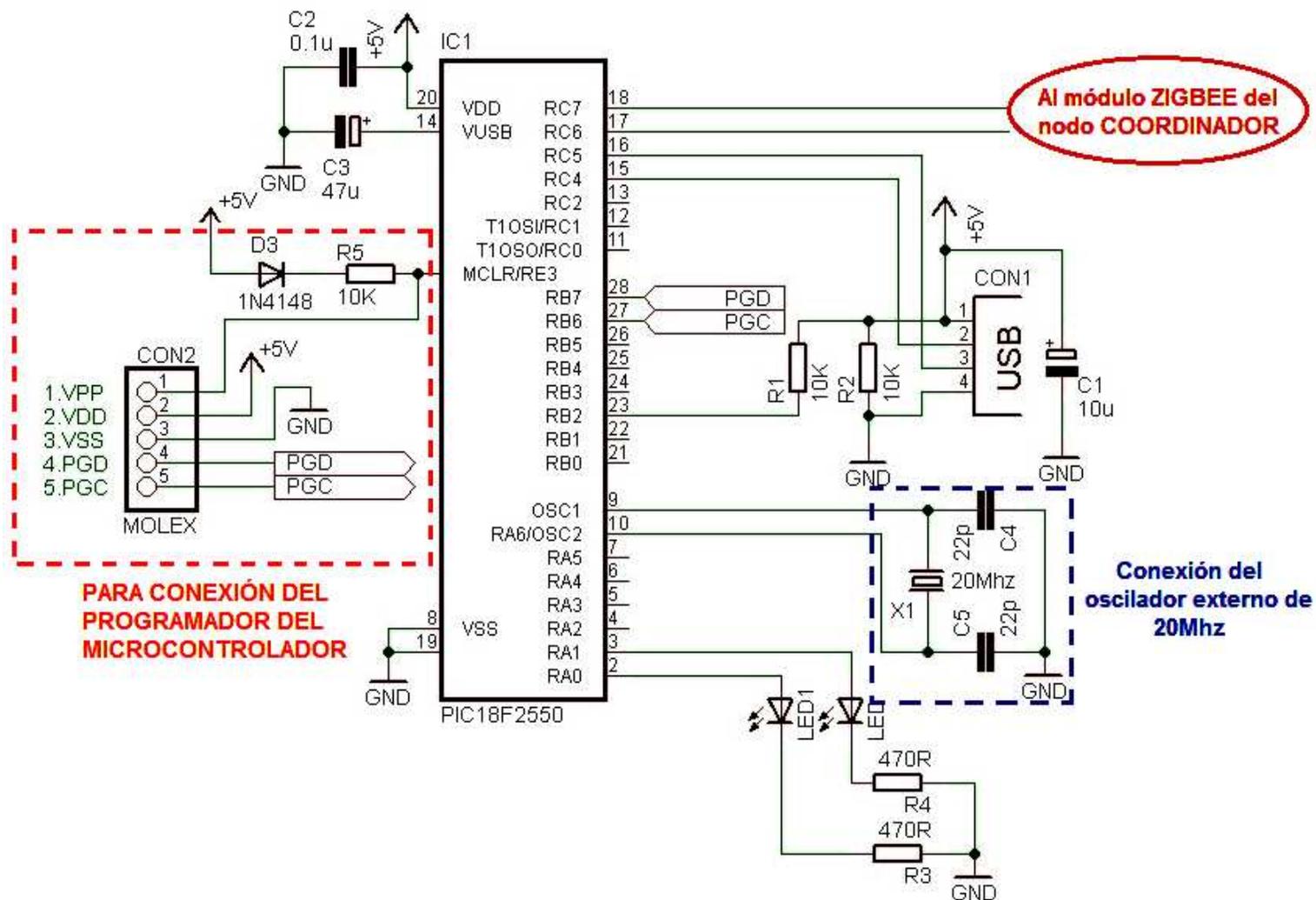


Figura 5.20: Diagrama de conexionado del PIC18F2550 del nodo COORDINADOR

**Tabla 5.7: Descripción de las funciones de los pines del PIC18F2550**

PIN	NOMBRE	FUNCIÓN
1	VPP	Voltaje de programación
2	RA0	Led indicador rojo (envío de datos a los nodos sensores)
3	RA1	Led indicador amarillo (recepción de datos de los nodos sensores)
4	RA2	No utilizado
5	RA3	No utilizado
6	RA4	No utilizado
7	RA5	No utilizado
8	VSS	Tierra (GND)
9	OSC1	Terminal de conexión del oscilador externo de 20MHz
10	OSC2	Terminal de conexión del oscilador externo de 20MHz
11	RC0	No utilizado
12	RC1	No utilizado
13	RC2	No utilizado
14	VUSB	Voltaje de alimentación del módulo USB (Recomendable usar un capacitor de 47uF – figura 5.6)
15	RC4	Datos del módulo USB (Voltaje diferencial)
16	RC5	
17	RC6	Datos transmitidos al módulo XBEE
18	RC7	Datos recibidos del módulo XBEE
19	VSS	Tierra (GND)
20	VDD	Alimentación de 5Vcd
21	RB0	Sin conexión
22	RB1	Sin conexión
23	RB2	Conexión del conector USB
24	RB3	Sin conexión
25	RB4	Sin conexión
26	RB5	Sin conexión
27	PGC	Conexión del programador del microcontrolador
28	PGD	Conexión del programador del microcontrolador

## 5.7 COMUNICACIÓN VÍA USB

### 5.7.1 GENERALIDADES

USB (Bus de serie universal), como su nombre lo sugiere, se basa en una arquitectura de tipo serial. Sin embargo, es una interfaz de entrada/salida mucho más rápida que los puertos seriales estándar. La arquitectura serial se utilizó para este tipo de puerto por dos razones principales:

- La arquitectura serial le brinda al usuario una velocidad de reloj mucho más alta que la interfaz paralela debido a que este tipo de interfaz no admite frecuencias demasiado altas (en la arquitectura de alta velocidad, los bits que circulan por cada hilo llegan con retraso y esto produce errores).
- Los cables seriales resultan mucho más económicos que los cables paralelos.

A partir de 1995, el estándar USB se ha desarrollado para la conexión de una amplia gama de dispositivos.

El estándar USB 1.0 ofrece dos modos de comunicación:

- 12Mbps en modo de alta velocidad (Dispositivos HIGH SPEED - FS).
- 1,5Mbps de baja velocidad (Dispositivos LOW SPEED - LS).

El estándar USB 1.1 brinda varias aclaraciones para los fabricantes de dispositivos USB, pero no cambia los rasgos de velocidad.

El estándar USB 2.0 permite alcanzar velocidades de hasta 480Mbps.

La compatibilidad entre USB 1.0, 1.1 y 2.0 está garantizada. Sin embargo, el uso de un dispositivo USB 2.0 en un puerto USB de baja velocidad (es decir 1.0 ó 1.1) limitará la velocidad a un máximo de 12Mbps. Además, es probable que el sistema operativo muestre un mensaje que indique que la velocidad será restringida.

Existen dos tipos de conectores USB (figura 5.21):

- Los conectores conocidos como tipo A, cuya forma es rectangular y se utilizan, generalmente, para dispositivos que no requieren demasiado ancho de banda (como el teclado, el ratón, las cámaras Web, etc.);
- Los conectores conocidos como tipo B poseen una forma cuadrada y se utilizan principalmente para dispositivos de alta velocidad (discos duros externos, etc.).

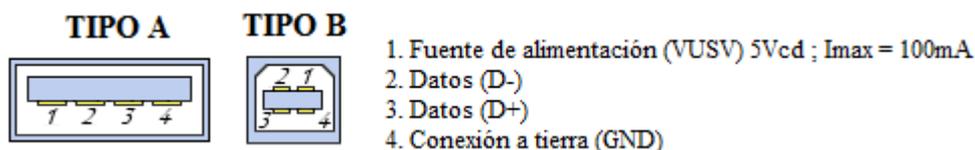


Figura 5.21: Tipos de conectores USB

Una característica de la arquitectura USB es que puede proporcionar fuente de alimentación a los dispositivos con los que se conecta, con un límite máximo de 15 V por dispositivo. Para poder hacerlo, utiliza un cable que consta de cuatro hilos (la conexión a tierra GND, la alimentación del BUS y dos hilos de datos llamados D- y D+) como se observa en la figura 5.22.

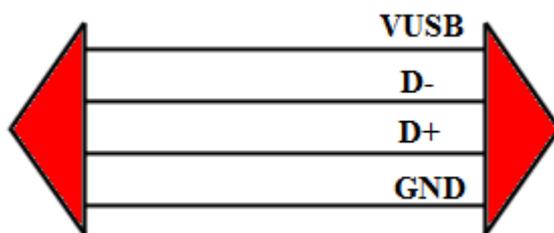


Figura 5.22: Conexión USB

La comunicación entre el host (PC) y los dispositivos USB se lleva a cabo según un protocolo (lenguaje de comunicación) basado en el principio de red en anillo. Esto significa que el ancho de banda se comparte temporalmente entre todos los dispositivos conectados. El host emite una señal para comenzar la secuencia cada un milisegundo, el intervalo de tiempo durante el cual le ofrecerá simultáneamente a cada dispositivo la oportunidad de "hablar". Cuando el host desea comunicarse con un dispositivo, transmite un paquete de datos que contiene la dirección del dispositivo cifrada en 7 bits que designa un dispositivo, de manera tal que es el host el que decide "hablar" con los dispositivos. Si el dispositivo reconoce su dirección en la red, envía un paquete de datos (entre 8 y 255 bytes) como respuesta, de lo contrario, le pasa el paquete a los otros dispositivos conectados. Los datos que se intercambian de esta manera están cifrados conforme a la codificación NRZI<sup>19</sup>.

Como la dirección está cifrada en 7 bits, 128 dispositivos pueden estar conectados simultáneamente a un puerto de este tipo. En realidad, es recomendable reducir esta cantidad a 127 porque la dirección 0 es una dirección reservada.

Debido a la longitud máxima de 5 metros del cable entre los dos dispositivos y a la cantidad máxima de 5 concentradores (a los que se les suministra energía), es posible crear una cadena de 25 metros de longitud.

Los puertos USB admiten dispositivos PLUG AND PLAY de conexión en caliente. Por lo tanto, los dispositivos pueden conectarse sin apagar el equipo (conexión en caliente).

Si un dispositivo está conectado al host, detecta cuando se está agregando un nuevo elemento gracias a un cambio de tensión entre los hilos D+ y D-. En ese momento, el equipo envía una señal de inicialización al dispositivo durante 10ms para después suministrarle la corriente eléctrica mediante los hilos GND y VBUS (hasta 100mA). A continuación, se le suministra corriente eléctrica al dispositivo y temporalmente se apodera de la dirección predeterminada (dirección 0). La siguiente etapa consiste en brindarle la dirección definitiva. Para hacerlo, el equipo interroga a los dispositivos ya conectados para poder conocer sus direcciones y asigna una nueva, que lo identifica por retorno. Una vez que cuenta con todos los requisitos necesarios, el host puede cargar el driver adecuado. [19]

## **5.7.2 MODOS DE TRANSFERENCIA DE DATOS**

USB soporta 4 tipos de transferencias de datos:

- Control: para configuración y control de dispositivos y para manejo del bus.
- Isócrono, para transmisión de información con ancho de banda y latencia garantizadas, necesario para aplicaciones como audio, telefonía y vídeo. Permite una comunicación periódica y continua entre el sistema y el dispositivo.

---

<sup>19</sup> Codificación NRZI: (No retorno a cero Invertido) Se trata de un método para encuadrar señales binarias, en las cuales se asigna un cambio de nivel lógico a cada uno de la señal original, mientras que los ceros mantendrán el nivel existente.

- Interrupción, para transferencias de pocos datos, no periódicas, de baja frecuencia pero con unos ciertos límites de latencia.
- Bulk, para transferencias de grandes cantidades de datos con dispositivos asíncronos, como impresoras, escáneres, cámaras de fotos (foto fija), etc.

Estos 4 tipos de transferencias están disponibles como interfaces software que el sistema pone a disposición de los manejadores de dispositivo, estando los manejadores obligados a comunicarse con los dispositivos de manera única y exclusivamente a través de estos 4 interfaces de programación.

Esto viene a significar que un manejador de dispositivo USB jamás accede directamente al hardware del dispositivo, y por otro lado significa que todos los dispositivos USB deben cumplir necesariamente unas especificaciones básicas comunes, ya que deben gestionar adecuadamente los tipos de transferencias que soportan.

Un término necesario para la explicación del tipo de tramas es el **Endpoint** es un buffer que almacena múltiples bytes, típicamente es un bloque de la memoria de datos o un registro dentro del microcontrolador. Todos los dispositivos deben soportar el punto terminal 0. Este punto terminal es el que recibe todo el control y las peticiones de estado durante la enumeración cuando el dispositivo está sobre el bus.

## Transferencias de Control

Modo utilizado para realizar configuraciones. Todos los dispositivos USB deben soportar este tipo de transferencia. Las transferencias de Control proporcionan control de flujo y una entrega de datos garantizada y libre de errores.

Todos los dispositivos full, high y low-speed pueden incorporar endpoints de Control, y por lo tanto pueden hacer uso de las transferencias de Control. Todos implementan, al menos, un endpoint de salida y uno de entrada en la dirección 0, para poder establecer la Pipe de Control por Defecto.

Se desarrollan en 3 transacciones:

- a) Transacción de configuración (Setup), en la que se envía al dispositivo un paquete que especifica la operación a ejecutar. Ocupa 8 bytes.
- b) Transacciones de datos, en las que se transfieren los paquetes de datos en el sentido indicado por la transacción de configuración. La información útil por paquete puede ser de 8, 16, 32 ó 64 bytes para Endpoints FS, y de 8 bytes para Endpoints LS.
- c) Transacción de estado, en la que el receptor informa del estado final de la operación.

USB hace una gestión “best effort”<sup>20</sup> para ir dando curso a las distintas transferencias de Control pendientes en cada momento en todas las pipes de Control establecidas con

---

<sup>20</sup> En telecomunicaciones se habla de “best effort”, a la forma de prestar aquellos servicios para los que no existe una garantía de calidad de servicio (QoS). Esto implica que no existe una preasignación de recursos, ni plazos conocidos, ni garantía de recepción correcta de la información.

todos los dispositivos. Para ello se hace la siguiente reserva del tiempo de trama o microtrama:

- En un bus full/low-speed, la reserva es del 10% del tiempo de trama.
- En un bus high-speed, la reserva es del 20% del tiempo de microtrama.

Las reglas definidas por USB para el envío de las transferencias pendientes son:

- Si el tiempo de trama o microtrama utilizado por las transferencias de Control pendientes es inferior al reservado, el tiempo restante puede utilizarse para transferencias Bulk.
- Si hay más transferencias de Control pendientes que tiempo reservado, pero hay tiempo adicional en la trama o microtrama no consumido por transferencias de Interrupción o Isócronas, entonces el host puede utilizar dicho tiempo adicional para enviar nuevas transferencias de Control.
- Si hay más transferencias de Control pendientes que tiempo disponible en una trama o microtrama, el host selecciona cuáles se procesan, quedando el resto pendientes para una próxima trama o microtrama.

Los endpoints de Control high-speed soportan el protocolo de control de flujo PING en las transacciones de Dato y Estado de salida.

Los datos de control sirven para configurar el periférico en el momento de conectarse al USB. Algunos drivers específicos pueden utilizar este enlace para transmitir su propia información de control.

Este modo de transferencia incorpora mecanismos de detección de errores (CRC) y de recuperación/retransmisión de datos, es decir que mediante este modo de transferencia, no se tiene pérdida de datos, puesto que los dispositivos de detección de recuperación de errores están activos a nivel USB.

## **Transferencias Isócronas (Flujo en tiempo real)**

Las transferencias Isócronas están diseñadas para soportar aquellos dispositivos que precisan una entrega de datos a velocidad constante, y en la que no importa la pérdida eventual de información. Esto es necesario para aplicaciones en que la información de tiempo va implícita en la propia velocidad de transmisión/recepción de datos.

Para ello, las transferencias Isócronas proporcionan:

- Ancho de banda garantizado
- Latencia limitada
- Velocidad de transferencia de datos constante garantizada a través de la pipe (enlace virtual indicado en el apartado 5.7.3)
- En caso de error en la entrega, no se reintenta la transmisión
- Sin control de flujo

Sólo los dispositivos high y full-speed pueden incorporar endpoints Isócronos.

Las transferencias Isócronas se componen sólo de transacciones de datos. Las frecuencias y los tamaños de los paquetes de datos son:

- Full-speed: 1 transacción por trama de hasta 1,023 bytes.
- High-speed: 1 transacción por microtrama de hasta 1,024 bytes.
- High-speed high-bandwidth: 2 ó 3 transacciones por microtrama de hasta 1,024 bytes cada una.

La gestión que hace USB para garantizar las transferencias es la de establecer o no la pipe en función de que haya suficiente tiempo libre de trama o microtrama para realizarlas. Para ello, los endpoints Isócronos indican qué cantidad de información como máximo debe transferir la pipe en cada trama o microtrama, de forma que el sistema USB puede calcular si hay suficiente tiempo o no para acomodar la pipe, y en función de eso la establece o no.

La reserva de tiempo de trama o microtrama para acomodar transferencias Isócronas y de Interrupción es como máximo el tiempo no reservado para transferencias de Control.

El sistema USB puede ir estableciendo pipes Isócronas y de Interrupción con distintos dispositivos hasta agotar dicha reserva:

- Full-speed: Hasta un 90% del tiempo de trama.
- High-Speed: Hasta un 80 % del tiempo de microtrama.

## **Transferencias de Interrupción**

Modo utilizado para transmisiones de pequeños paquetes, rápidos, orientados a percepciones humanas (ratón, punteros). Este tipo de transferencia es para dispositivos que deben recibir atención periódicamente y lo utilizan los dispositivos de baja velocidad LS.

Este tipo de transmisión garantiza la transferencia de pequeñas cantidades de datos. El tiempo de respuesta no puede ser inferior al valor especificado por la interfaz. El ratón o cualquier otro dispositivo apuntador es una aplicación típica de este modo de transmisión.

Las transferencias de Interrupción están diseñadas para soportar aquellos dispositivos que precisan enviar o recibir datos de manera no frecuente, pero con ciertos límites de latencia.

Para ello, las transferencias de Interrupción proporcionan:

- Tiempo máximo de servicio (latencia) garantizado

- Reintento de transferencia en el siguiente periodo, en caso de eventual fallo en la entrega.

Todos los dispositivos high, full y low-speed pueden incorporar endpoints de Interrupción.

Las transferencias de Interrupción se componen sólo de transacciones de datos. Los tamaños de los paquetes de datos son:

- Low-speed: hasta 8 bytes.
- Full-speed: hasta 64 bytes.
- High-speed: hasta 1,024 bytes.
- High-speed high-bandwidth: 2 ó 3 transacciones por microtrama de hasta 1,024 bytes cada una.

La gestión que hace USB para garantizar las transferencias es la de establecer o no la pipe en función de que haya suficiente tiempo libre de trama o microtrama para realizarlas. Para ello, los endpoints de Interrupción indican qué cantidad de información como máximo debe transferir la pipe en cada transacción, así como el tiempo máximo entre transacciones, de forma que el sistema USB puede calcular si hay suficiente tiempo o no para acomodar la pipe, y en función de eso la establece o no.

El tiempo máximo entre transacciones (tiempo de latencia máximo) especificado por cada dispositivo puede ser:

- Low-speed: de 10 a 255ms
- Full-speed: de 1 a 255ms
- High-speed: de 125us a 4'096seg.

La reserva de tiempo de trama o microtrama para acomodar transferencias Isócronas y de Interrupción es como máximo el tiempo no reservado para transferencias de Control.

El sistema USB puede ir estableciendo pipes Isócronas y de Interrupción con distintos dispositivos hasta agotar dicha reserva:

- Full y Low-speed: Hasta un 90% del tiempo de trama.
- High-Speed: Hasta un 80 % del tiempo de microtrama.

## **Transferencias Bulk**

Las transferencias Bulk están diseñadas para soportar aquellos dispositivos que precisan enviar o recibir grandes cantidades de datos, con latencias que pueden tener amplias variaciones, y en que las transacciones pueden utilizar cualquier ancho de banda disponible.

Para ello, las transferencias Bulk proporcionan:

- Acceso al bus en función del ancho de banda disponible.
- Reintento de transferencias en caso de errores de entrega.
- Entrega garantizada de datos, pero sin garantía de latencia máxima ni de ancho de banda.

Las transferencias Bulk se realizan relativamente rápidas si el bus dispone de mucho ancho de banda libre, pero en un bus USB con mucho ancho de banda reservado, pueden alargarse durante periodos de tiempo relativamente grandes. Sólo los dispositivos high y full-speed pueden incorporar endpoints Bulk.

Las transferencias Bulk se componen sólo de transacciones de datos. Los tamaños de los paquetes de datos son:

- Full-speed: 8, 16, 32 y 64 bytes.
- High-speed: 512 bytes.

USB hace una gestión “good effort” para ir dando curso a las distintas transferencias pendientes en cada momento en todas las pipes Bulk establecidas con todos los dispositivos. Las transferencias de Control tienen preferencia sobre las Bulk, por lo que las transferencias Bulk se realizan siempre que no haya otro tipo de transferencias que hacer en una trama o microtrama.

Los endpoints Bulk-OUT high-speed soportan el protocolo de control de flujo PING. [18]

### 5.7.3 ENLACES VIRTUALES (PIPES)

Las tuberías (Pipes) son enlaces virtuales entre el host (la PC) y el dispositivo USB, este enlace configura los parámetros asociados con: el ancho de banda, tipo de transferencia se va a utilizar (Control, Bulk, Isócrona o Interrupción), dirección del flujo de datos y el máximo y/o mínimo tamaño de los paquetes/buffer.

Cada enlace está caracterizado por su banda de paso (Token), su tipo de servicio, el número de punto terminal (End Point) y el tamaño de los paquetes.

Estos enlaces se definen y crean durante la inicialización del USB.

Siempre existe un enlace virtual 0 que permite tener acceso a la información de configuración del periférico USB (estado, control e información).

La norma USB define 2 tipos de enlaces virtuales (pipe); STREAM y MESSAGE.

- **STREAM PIPES:** se trata de un flujo sin formato USB definido, esto significa que se puede enviar cualquier tipo de dato. Este tipo de pipe soporta las transferencias bulk, isócronas, e interrupción.

Es una vía de comunicación unidireccional entre el host y un endpoint de los tipos Bulk, Interrupción o Isócrono. Si un dispositivo necesita transferencias bidireccionales de un tipo de endpoint concreto, el sistema debe establecer dos pipes, una de salida (con un endpoint de salida) y otra de entrada (con un endpoint de entrada).

- **MESSAGE PIPES:** este tipo de enlace virtual si tiene un formato USB definido y solo puede soportar la transferencia Control.

Es una vía de comunicación bidireccional entre el host y dos endpoints de control en un dispositivo USB. Un endpoint es de salida y el otro es de entrada, de forma que se pueda establecer la comunicación bidireccional. Todos los dispositivos USB disponen de dos endpoints de control en la dirección 0, uno de entrada y uno de salida, de manera que el sistema siempre puede establecer una pipe de Control con el dispositivo, incluso antes de configurarlo (se denomina Pipe de Control por Defecto, y es la única “pipe” que se puede establecer antes de configurar al dispositivo). A través de esta “pipe”, el sistema puede leer del dispositivo toda la información descriptiva necesaria para enterarse del tipo de dispositivo, posibles configuraciones, protocolos que soporta, número y tipos de endpoints que soporta en cada posible configuración, etc. Esta información descriptiva son los Descriptores. [19]

## **5.8 CONFIGURACIÓN DEL NODO COORDINADOR COMO DISPOSITIVO USB BULK**

Considerando que la aplicación que se está implementando requiere enviar o recibir grandes cantidades de datos, con latencias que pueden tener amplias variaciones, y en que las transacciones pueden utilizar cualquier ancho de banda disponible, se decidió utilizar una transferencia tipo BULK en el nodo coordinador.

El nodo coordinador es el que mantiene comunicación directa con el computador encargado de la gestión de la interfaz HMI desarrollada, en LABVIEW, a través del puerto USB (disponible en el PIC18F2550), para lo cual se ha configurado a este nodo como un dispositivo USB BULK, el mismo que como cualquier otro dispositivo USB (flash memory, impresoras, mouse), necesita de un controlador que permita el reconocimiento del dispositivo.

Por tal razón fue necesario generar el controlador del nodo creado.

Debido a que el nodo coordinador que se desarrollo realiza la comunicación USB a través del PIC18F2550 de la MICROCHIP, es necesario descargar las librerías USB<sup>21</sup> para Windows que permitan establecer los enlaces virtuales (PIPES) de lectura y escritura, así como también que permitan instalar el dispositivo como USB BULK.

---

<sup>21</sup> Enlace para acceder a las librerías de MICROCHIP:  
[http://www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS\\_GET\\_PAGE&nodeId=2680&dDocName=en547784](http://www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS_GET_PAGE&nodeId=2680&dDocName=en547784)

Los drivers descargados para la instalación del controlador del NODO COORDINADOR son lo que se observan en la figura 5.23.

Nombre	Fecha modificación	Tipo	Tamaño
6	03/01/2008 19:26	Icon	4 KB
Ioctl.h	30/09/2004 6:28	Archivo H	8 KB
mchpusb	04/01/2008 1:05	Catálogo de segur...	12 KB
mchpusb	19/06/2012 13:53	Información sobre...	3 KB
mchpusb.sys	19/12/2007 11:40	Archivo de sistema	53 KB
mchpusb64.sys	19/12/2007 11:40	Archivo de sistema	63 KB

Figura 5.23: Drivers controlador del dispositivo USB de MICROCHIP

A fin de personalizar el controlador del NODO COORDINADOR, se procede a editar algunos parámetros del archivo “mchpusb” (figura 5.24)

```

mchpusb - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
ServiceType=1
StartType=3
ErrorControl=1
ServiceBinary=%12%\MFGFILENAME%. sys
;
; windows XP/Vista 64
;
[DriverInstall64]
CopyFiles=DriverCopyFiles64
[DriverCopyFiles64]
%MFGFILENAME%64. sys,,2
[DriverInstall64.Services]
AddService=MCHPUSB,2,DriverService64
[DriverService64]
ServiceType=1
StartType=3
ErrorControl=1
ServiceBinary=%12%\MFGFILENAME%64. sys
;
;
[DeviceList]
%DESCRIPTION%=DriverInstall, USB\VID_04D8&PID_000B
[DeviceList.ntamd64]
%DESCRIPTION%=DriverInstall64, USB\VID_04D8&PID_000B
;
; String Definitions
;
[Strings]
DEVICEMANAGERCATEGORY="Monitoreo ZIGBEE"
MFGFILENAME= "mchpusb"
MFGNAME="Electronica ESPE"
INSTDISK="Proveedor - Disco Instalacion"
DESCRIPTION="Bridge USB-ZIGBEE"
;
; Source Files
;
[SourceDisksFiles]
mchpusb. sys=1
mchpusb64. sys=1
6. ico=1

```

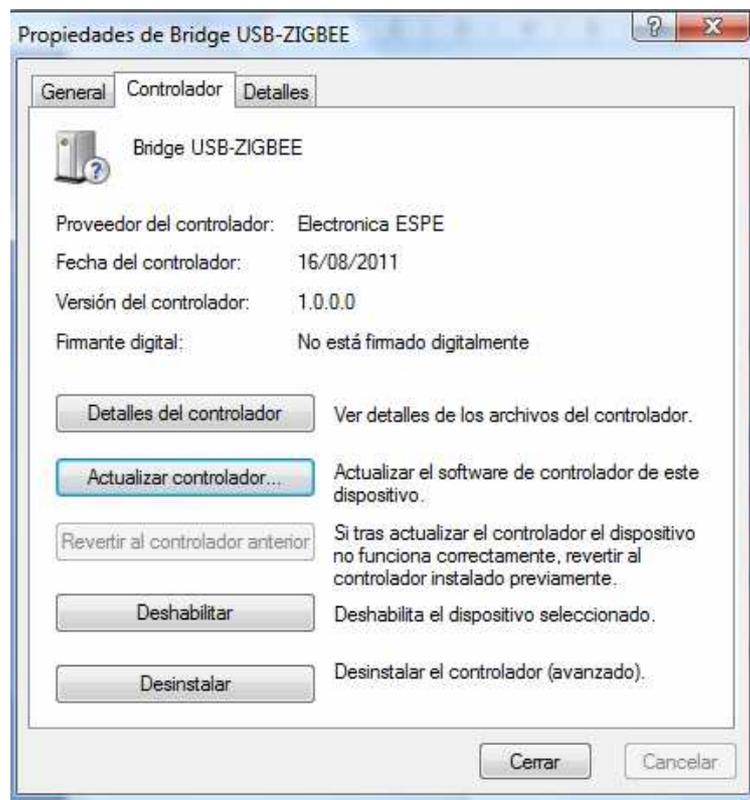
Figura 5.24: Archivo de configuración del controlador USB del NODO COORDINADOR

La primera vez que se conecte el NODO COORDINADOR al computador, será necesario actualizar el controlador del dispositivo, para lo cual se debe seleccionar la opción de buscar el controlador en el disco local (Especificando la ubicación de los archivos mostrados en la figura 5.23) y no en la Web. Si el proceso de actualización se realizó de manera correcta aparecerá la pantalla que se muestra en la figura 5.25



**Figura 5.25: Actualización del controlador del NODO COORDINADOR**

Las figuras 5.26 y 5.27 muestran detalles del dispositivo USB correspondiente al NODO COORDINADOR instalado.



**Figura 5.26: Datos del NODO COORDINADOR como dispositivos USB**

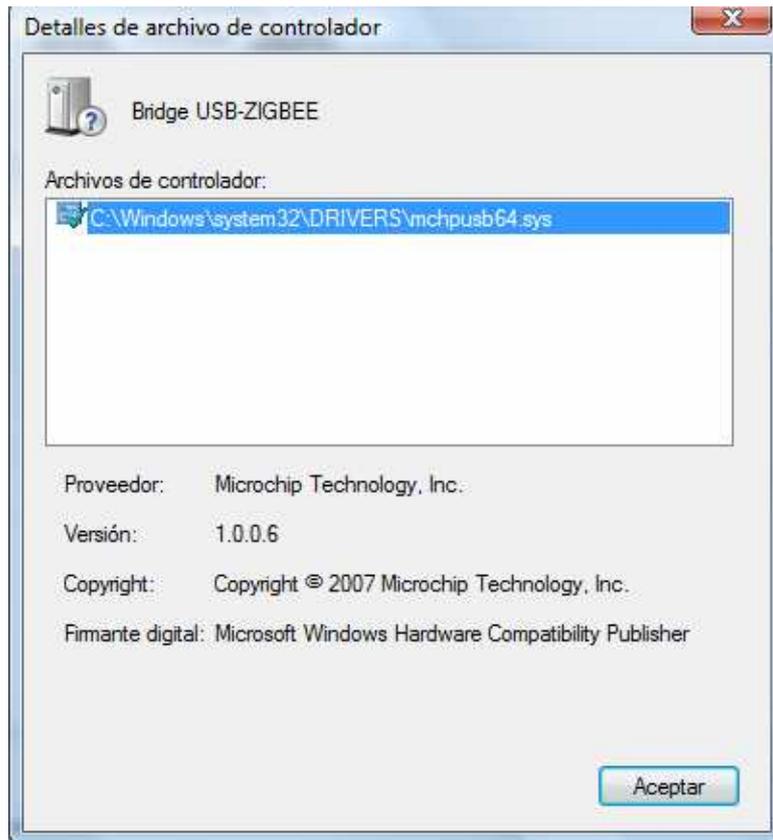


Figura 5.27: Detalles del NODO COORDINADOR como dispositivos USB

## 5.9 PROGRAMACIÓN DEL MICROCONTROLADOR DEL NODO COORDINADOR

La programación del PIC8F2550 que forma parte del nodo coordinador, se realizó con el lenguaje de programación C. El diagrama de flujo que representa la programación desarrollada, se muestra en las figuras 5.28 y 5.29.

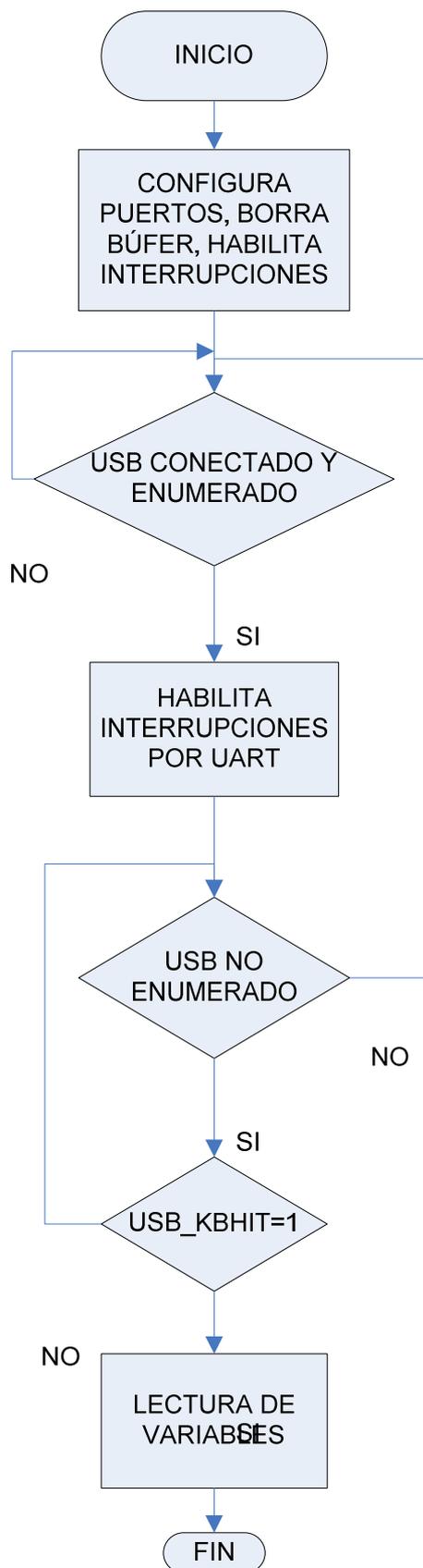


Figura 5.28: Diagrama de flujo del programa principal del nodo coordinador.

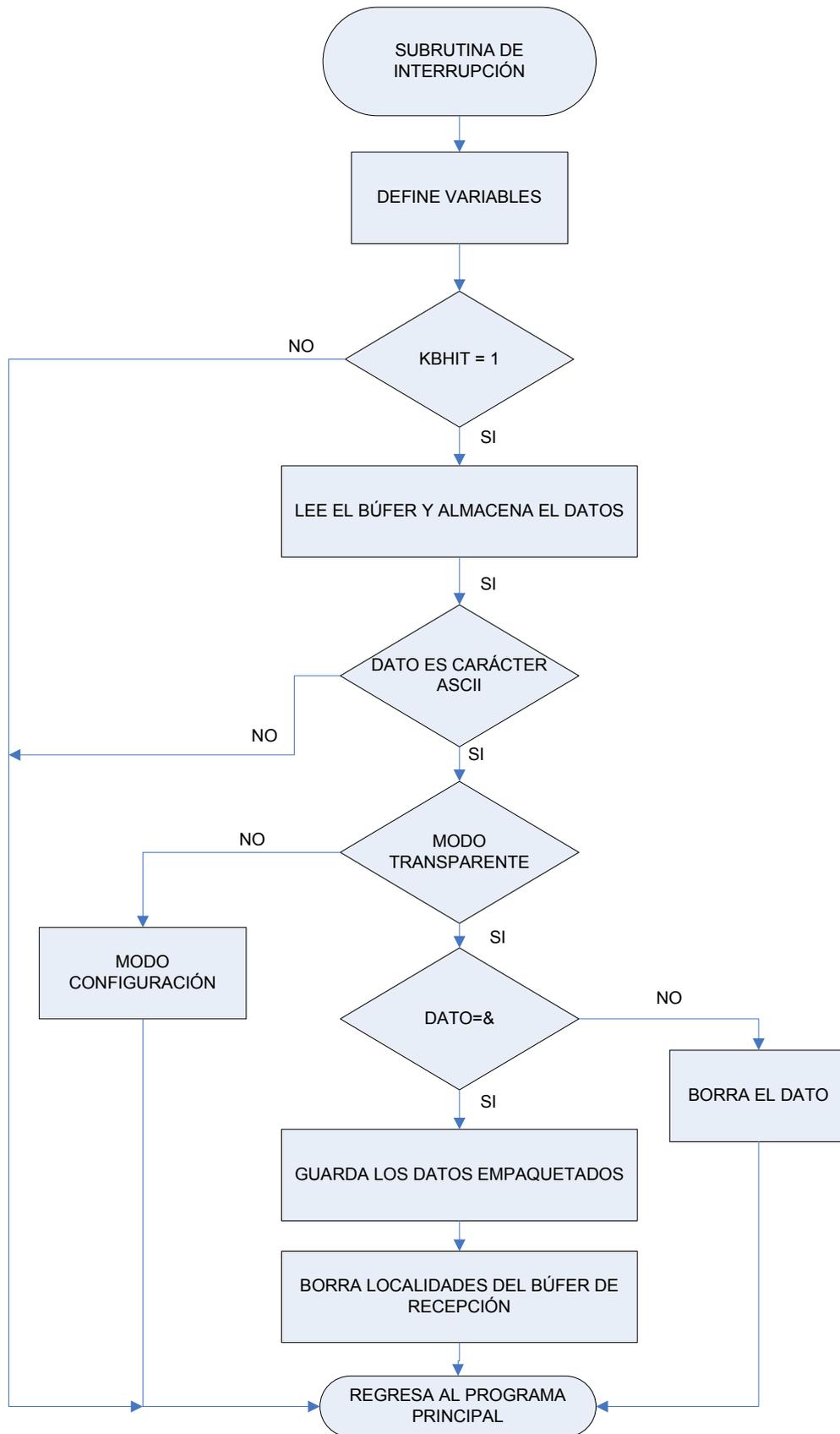


Figura 5.29: Diagrama de flujo de subrutina de interrupción del nodo coordinador.

# **CAPÍTULO VI**

## **Diseño de la Interfaz HMI**

## 6.1 GENERALIDADES

La sigla HMI es la abreviación en inglés de Interfaz Hombre – Máquina. Los sistemas HMI pueden ser concebidos como una “ventana” de un proceso. Esta ventana puede estar en dispositivos especiales como paneles de operador o en un computador. Las señales de los procesos son conducidas al HMI por medio de dispositivos como tarjetas de entrada/salida, PLC`s, RTU (Unidades remotas de entrada/salida), etc. En este proyecto, los datos se conducen al HMI a través del NODO COORDINADOR creado.

Las funciones que realizará una interfaz HMI son:

- **Monitoreo:** definida como la habilidad de obtener y mostrar datos de una planta o un proceso, en tiempo real. Estos datos se pueden mostrar como números, textos o gráficos que permitan una lectura más fácil de interpretar.
- **Supervisión:** esta función permite junto con el monitoreo la posibilidad de ajustar las condiciones de trabajo del proceso directamente desde la computadora.
- **Alarmas:** es la capacidad de reconocer eventos excepcionales dentro del proceso y reportarlos. Las alarmas son reportadas basadas en límites de control pre-establecidos.
- **Control:** es la capacidad de aplicar algoritmos que ajusten los valores del proceso y así mantenerlos dentro de ciertos límites.

El sistema propuesto cumplirá las funciones de: monitoreo, supervisión y generación de alarmas de las variables físicas del invernadero.

Para el desarrollo de la interfaz HMI, se utilizó LABVIEW 2011 de NATIONAL INSTRUMENTS<sup>22</sup>.

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es un lenguaje de programación gráfico para el diseño de sistemas de adquisición de datos, instrumentación y control. LabVIEW permite diseñar interfaces de usuario mediante una consola interactiva basada en software. Tiene la ventaja de que permite una fácil integración con hardware, específicamente con tarjetas de medición, adquisición y procesamiento de datos.

Al diseñar programas con LabVIEW se trabaja siempre bajo algo denominado VI, es decir, un instrumento virtual. Se puede crear VI a partir de especificaciones funcionales diseñadas por el programador.

Las principales características de LabVIEW son las siguientes:

- Entorno de desarrollo gráfico, desaparece el código en formato texto. Con lo que se consigue una programación más intuitiva.
- Diseño de la interfaz gráfica del instrumento virtual, utilizando elementos (controles numéricos, gráficos, etc.) prediseñados.
- Gestión automática en la creación de hilos de ejecución.

---

<sup>22</sup> Página oficial: <http://www.ni.com/es/>

- Herramientas convencionales para la depuración de los programas (VI): ejecución paso a paso, puntos de ruptura, flujo de datos, etc.
- Programación modular.
- Interfaces de comunicación: puerto serial, puerto paralelo, protocolo GPIB, PXI, VXI, TCP/IP, UDP, IRDA, BLUETOOTH, USB, OPC.
- Capacidad de interactuar con otros lenguajes y aplicaciones: librería DLL, NET, ActiveX, MultiSim, Matlab, Autocad, SolidWorks.

## 6.2 LIBRERÍA DINÁMICA MPUSBAPI.DLL DE MICROCHIP

Para lograr comunicar los datos del nodo coordinador que fue configurado como dispositivo USB BULK con LabVIEW, es necesario utilizar una librería dinámica DLL de MICROCHIP para puerto USB<sup>23</sup>.

La librería para USB que se utilizó es MPUSBAPI.dll, la misma que debe ser instalada en el computador en el que se va a diseñar el HMI.

Para una mayor facilidad de desarrollo de aplicaciones basadas en el bus USB, Microchip ha creado un archivo DLL en el que proporciona las funciones de acceso al puerto USB con un microcontrolador de la familia PIC18Fxx5x.

Para un funcionamiento correcto, se necesita el driver mchpusb.sys. Este archivo sirve tanto para Visual Basic como para Visual C, entre otros.

Para este proyecto, de forma específica se analizará las funciones de la librería que nos permitan:

- Conocer la versión de la librería DLL instalada: MPUSBGetDLLVersion
- Conocer el número de nodos activos: MPUSBGetDeviceCount
- Abrir el canal virtual de comunicación (PIPE): MPUSBOpen
- Lectura de datos: MPUSBRead
- Escritura de datos: MPUSBWrite
- Cierre del canal virtual de comunicación: MPUSBClose

Existen más funciones disponibles para esta librería, sin embargo en este trabajo se hablará únicamente de las funciones utilizadas.

**FUNCIÓN MPUSBGetDLLVersion (VOID)** Lee el nivel de revisión del MPUSAPI.dll. Es un nivel de revisión de 32bits. Esta función no devuelve la versión del código, no realiza nada con el USB. Devuelve la versión de la DLL en formato hexadecimal de 32bits.

---

<sup>23</sup> Enlace para acceder a las librerías de MICROCHIP:  
[http://www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS\\_GET\\_PAGE&nodeId=2680&dDocName=en547784](http://www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS_GET_PAGE&nodeId=2680&dDocName=en547784)

**FUNCIÓN MPUSBGetDeviceCount (pVID\_PID)** devuelve el número de dispositivos con VID y PID asignado.

- Entrada **pVID\_PID**: es un string que contiene el PID&VID del dispositivo objetivo. El formato es: “vid\_xxxx&pid\_yyy”. Donde xxxx es el valor del VID y el yyy el del PID, los dos en hexadecimal.

Para este caso el valor de este campo de entrada corresponde a: vid\_004d&pid\_000b

**FUNCIÓN MPUSBOpen (instance, pVID\_PID, pEP, dwDir, dwReserved)** devuelve el acceso al pipe del ENDPOINT con el VID\_PID asignado. Todos los pipes se abren con el atributo FILE\_FLAG\_OVERLAPPED. Esto permite que las funciones MPUSBRead, MPUSBWrite tenga un valor de TIMEOUT.

- Entrada **Instance**: un número de dispositivo para abrir. Normalmente se utiliza primero la llamada de MPUSBGetDeviceCount para saber cuántos dispositivos hay.

Es importante entender que el driver lo comparten distintos dispositivos.

El número devuelto por MPUSBGetDeviceCount tiene que ser igual o menor que el número de todos los dispositivos actualmente conectados y usando el driver genérico.

Al llamar a esta función, siempre debe existir un mecanismo que intente llamar MPUSBOpen desde 0 hasta el máximo número de dispositivos conectados.

- Entrada **pVID\_PID**: ya se indicó en la función anterior.
- Entrada **pEP**: es un string con el número del ENDPOINT que se va a abrir. El formato es: “\\MCHP EPz” o “\MCHP EPz”, dependiendo del lenguaje de programación. Donde z es el número del ENSPOINT en decimal. En LabVIEW se utiliza la segunda opción.
- Entrada **dwDir**: es un valor numérico que especifica la dirección del ENDPOINT. “0 si el pipe es de escritura (Trabajaría simultáneamente con la función MPUSBWrite)” y “1 si el pipe es de lectura (Trabajaría simultáneamente con la función MPUSBRead)”
- Entrada **dwReserved**: no se está utilizando.

**FUNCIÓN MPUSBRead (handle, pData, dwLen, PLenght, dwMilliseconds)** devuelve un string con los datos que son leídos a través de la pipe.

- Entrada **handle**: identifica al pipe del ENDPOINT que se va a leer. Debe estar unida a la salida de una función MPUSBOpen que haya sido configurada como apertura de pipe de lectura (atributo dwDir es "1").
- Salida **pData**: puntero al buffer que recibe el dato leído de la pipe.
- Entrada **dwLen**: especifica el número de bytes que hay que leer al pie de la pipe.

Para la interfaz implementada el PIC18F2550 envía paquetes cuya longitud va desde el byte 0 al byte 15 con la siguiente estructura:

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
I1	DATO1				I2	DATO2				I3	DATO3				I4

- I1 representa el inicio de envío del DATO1
- I2 representa el inicio de envío del DATO2
- I3 representa el inicio de envío del DATO3
- I4 representa la finalización del envío del paquete que siempre estará representado por el caracter "\$"
- Los datos pueden tener valores desde 0 – 1023 (determinado en función de los 10bits de resolución del microcontrolador PIC16F88 de cada nodo sensor)

Para el nodo 1, el paquete enviado sería:

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
A	Temperatura				B	Humedad relativa				C	Voltaje batería 1				\$

Para el nodo 2, el paquete enviado sería:

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
D	CO2				E	Luminosidad				F	Voltaje batería 2				\$

Para el nodo 3, el paquete enviado sería:

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
G	Humedad suelo				H	Auxiliar				E	Voltaje batería 3				\$

- Salida **PLenght**: puntero al número de bytes leídos. MPUSBRead pone este valor a cero antes de cualquier lectura o de chequear un error.
- Entrada **dwMilliseconds**: especifica el intervalo de TIMEOUT en milisegundos. La función vuelve si transcurre el intervalo aunque no se complete la operación. Si dwMilliseconds = 0, la función devuelve los datos de la pipe y vuelve inmediatamente. Si dwMilliseconds = ∞, el intervalo de TIMEOUT nunca termina.

Se selecciono un intervalo de TIMEOUT de 100ms.

**FUNCIÓN MPUSBWrite (handle, pData, dwLen, PLenght, dwMilliseconds)** devuelve un string con los datos que son van a ser escritos en el pipe.

- Entrada **handle**: identifica el pipe del ENDPOINT que se va a escribir. Debe estar unida a la salida de una función MPUSBOpen que haya sido configurada como apertura de pipe de lectura (atributo dwDir es “0”).
- Salida **pData**: puntero al buffer que contiene los datos que se van a escribir en la pipe.
- Entrada **dwLen**: especifica el número de bytes que se van a escribir en la pipe.

En el sistema implementado solo se escribe un byte correspondiente al caracter “&” para indicarle al PIC18F2550 que inicie el envío de comando AT al módulo ZIGBEE.

- Salida **PLenght**: puntero al número de bytes que se escriben al llamar esta función. MPUSBWrite pone este valor a cero antes de cualquier lectura o de chequear un error.
- Entrada **dwMilliseconds**: especifica el intervalo de TIMEOUT en milisegundos. La función vuelve si transcurre el intervalo aunque no se complete la operación. Si dwMilliseconds = 0, la función devuelve los datos de la pipe y vuelve inmediatamente. Si dwMilliseconds =  $\infty$ , el intervalo de TIMEOUT nunca termina.

Se selecciono un intervalo de TIMEOUT de 30ms.

**FUNCIÓN MPUSBClose (handle)** cierra una determinada unión.

- Entrada **handle**: identifica la pipe del ENDPOINT que se va a cerrar. [21]

### 6.3 ENLACE DE LAS FUNCIONES DE MPUSBAPI.DLL A LABVIEW

Mediante la función de LabVIEW, llamada “CALL LIBRARY FUNCTION NODE”, es posible enlazar y configurar a cada una de las funciones definidas en el apartado 6.2, a través del siguiente procedimiento.

En la pantalla de configuración de CALL LIBRARY FUNCTION (figura 6.1) se debe especificar la PATH donde se encuentra la librería MPUSBAPI.DLL, así como también el nombre de la función de USB a la que se desea tener acceso.

En este trabajo, se tomará como ejemplo únicamente la configuración de la función MPUSBWrite, debido a que el procedimiento es similar para el resto de funciones utilizadas.

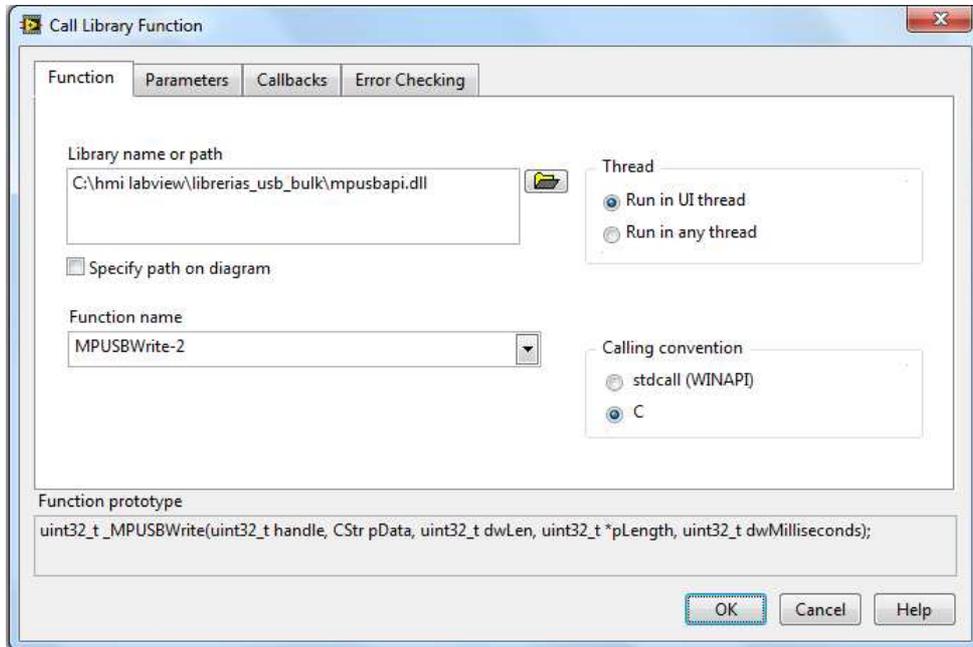


Figura 6.1: Pantalla de acceso a las funciones de la librería MPUSBAPL.DLL

En la pestaña PARAMETRES, se debe agregar cada uno de los atributos de entrada y de salida de la función que se ha seleccionado, además se debe definir el tipo de dato para cada uno de ellos, como se indica en la figura 6.2.

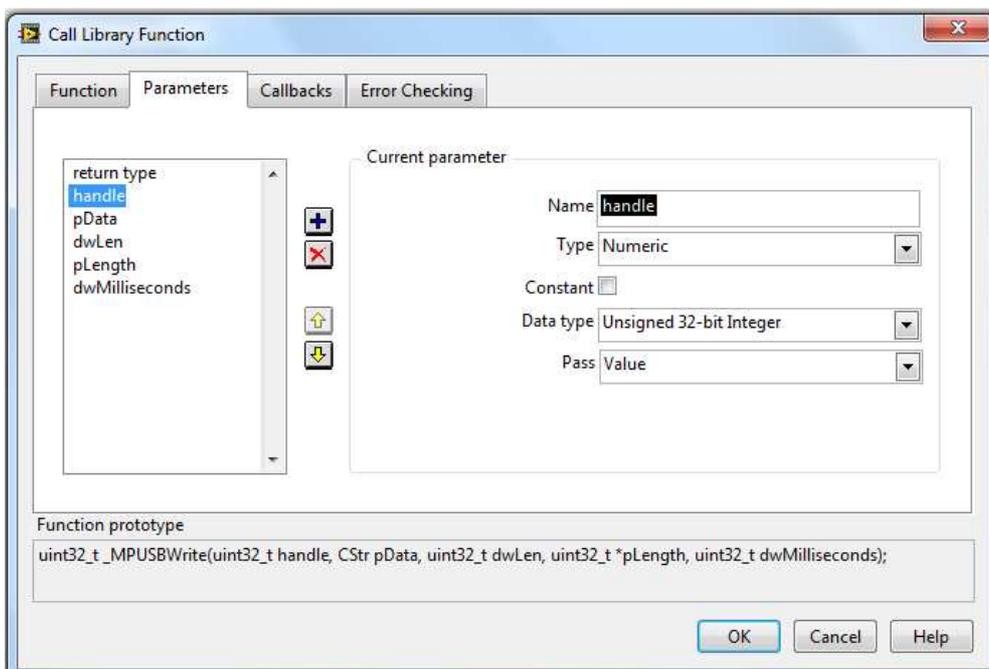


Figura 6.2: Pantalla de configuración de los atributos de entrada y salida de la función

Una vez realizadas estas configuraciones y aceptando los cambios, en la pantalla del diagrama de bloques de LabVIEW se generará el ícono correspondiente a la función creada, en este caso MPUSBWrite que se indica en la figura 6.3.

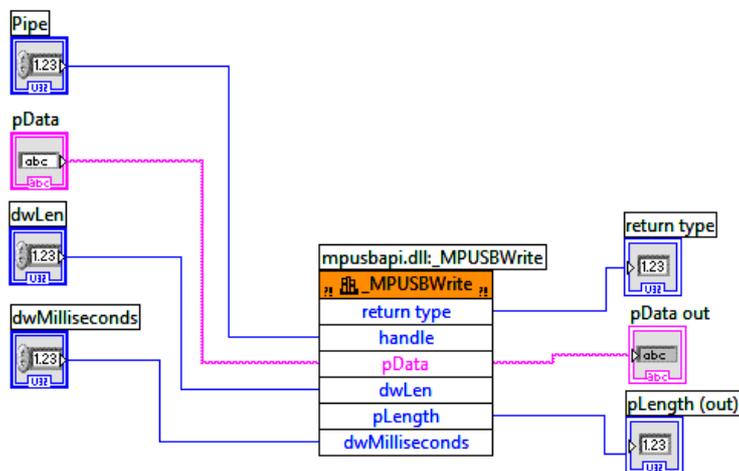


Figura 6.3: Icono de la función MPUSBWrite

Este procedimiento se repite para el resto de funciones.

Las siguientes tablas y figuras, resumen los valores configurados a los atributos de entrada y salida de cada una de las funciones USB utilizadas en la implementación del sistema.

Tabla 6.1: Parámetros de configuración función MPUSBGetDeviceCount

Parámetro	Entrada/Salida	Tipo de variable	Tipo de dato
Número de nodos encontrados	Salida	Numeric	Unsigned 16 bit Integer
pVID_PID	Entrada	String	C String Pointer

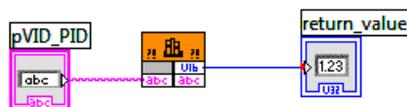


Figura 6.4: Ícono de la función MPUSBGetDeviceCount

Tabla 6.2: Parámetros de configuración función MPUSBOpen

Parámetro	Entrada/Salida	Tipo de variable	Tipo de dato
Instance	Entrada	Numeric	Unsigned 32 bit Integer
pVID_PID	Entrada	String	C String Pointer
pEP	Entrada	String	C String Pointer
dwDir	Entrada	Numeric	Unsigned 32 bit Integer
dwReserved	Entrada	Numeric	Unsigned 32 bit Integer
Habilita el pipe	Salida	Numeric	Unsigned 32 bit Integer

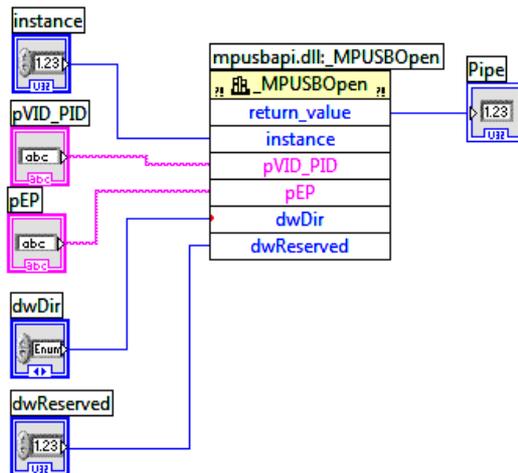


Figura 6.5: Icono de la función MPUSBOpen

Tabla 6.3: Parámetros de configuración función MPUSBWrite

Parámetro	Entrada/Salida	Tipo de variable	Tipo de dato
handle	Entrada	Numeric	Unsigned 32 bit Integer
pData	Salida	String	C String Pointer
dwLen	Entrada	Numeric	Unsigned 32 bit Integer
PLength	Salida	Numeric	Unsigned 32 bit Integer
dwMilliseconds	Entrada	Numeric	Unsigned 32 bit Integer

El ícono de la función MPUSBWrite se indicó anteriormente en la figura 6.3.

Tabla 6.4: Parámetros de configuración función MPUSBRead

Parámetro	Entrada/Salida	Tipo de variable	Tipo de dato
handle	Entrada	Numeric	Unsigned 32 bit Integer
pData	Salida	String	C String Pointer
dwLen	Entrada	Numeric	Unsigned 32 bit Integer
PLength	Salida	Numeric	Unsigned 32 bit Integer
dwMilliseconds	Entrada	Numeric	Unsigned 32 bit Integer

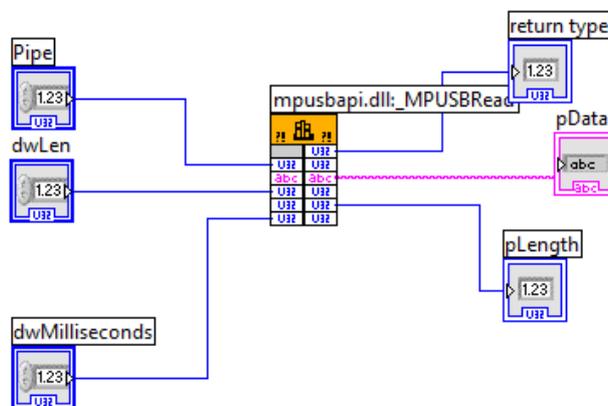


Figura 6.6: Icono de la función MPUSBRead

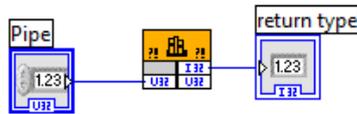


Figura 6.7: Icono de la función MPUSBClose

Tabla 6.5: Parámetros de configuración función MPUSBOpen

Parámetro	Entrada/Salida	Tipo de variable	Tipo de dato
handle	Entrada	Numeric	Unsigned 32 bit Integer

## 6.4 DESARROLLO DE LA INTERFAZ HMI EN LABVIEW

Se ha creado en el panel frontal de LabVIEW una pantalla de inicio (figura 6.8) de la interfaz, en la que se visualizará el número de nodos activos en la red, versión de la DLL, y se verifica si el dispositivo USB (Nodo coordinador) está conectado y correctamente autenticado. Si estos datos son correctos, se permite el acceso al sistema de monitoreo.

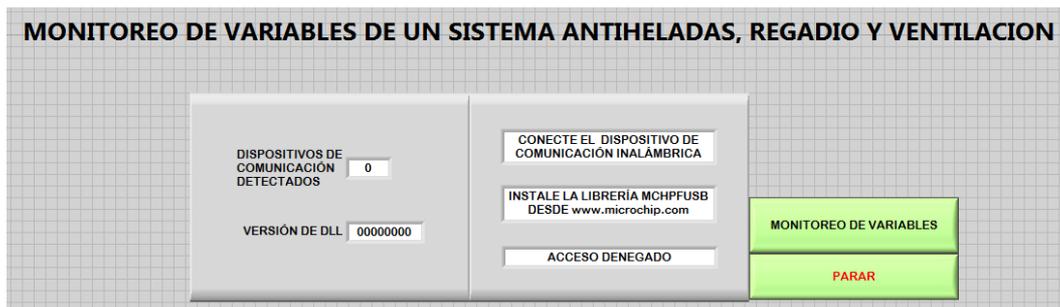


Figura 6.8: Panel Frontal de la pantalla de inicio de la interfaz HMI

La programación desarrollada para la pantalla de inicio, se muestra en la figura 6.9.

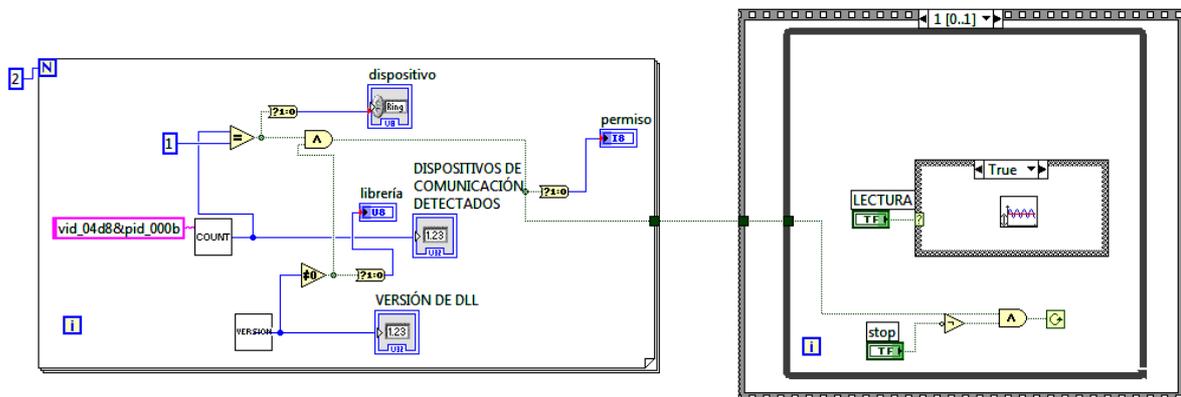
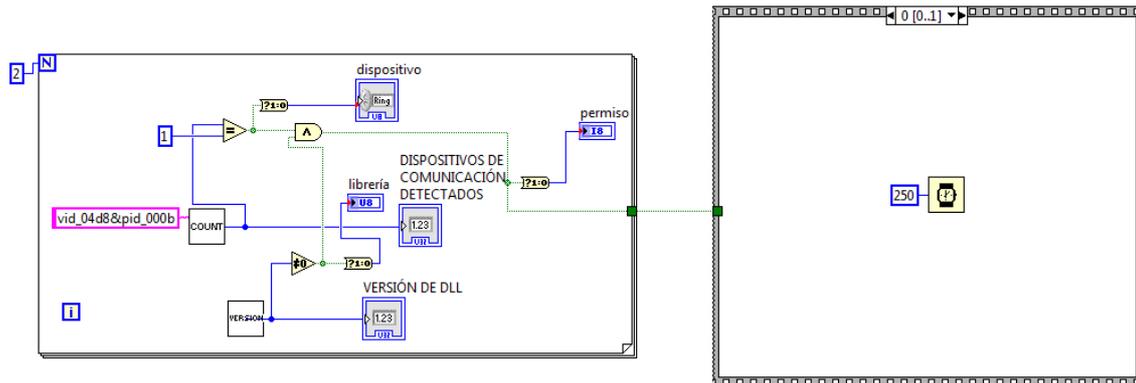


Figura 6.9: Diagrama de bloques de la pantalla de inicio de la interfaz HMI (Acceso Permitido)

Con la ayuda de los SUBVI's "COUNT" Y "VERSION", creados a partir de las funciones MPUSBGetDeviceCount y MPUSBGetDLLVersion, se verifica existen nodos activos y si la librería fue instalada de forma correcta.

En el caso de que el acceso al monitorea fue concedido, se realiza la programación de la Secuencia 1 donde se ubica el SUBVI de Monitoreo.

Si el acceso es denegado, se realiza la programación de la Secuencia 0 (Figura 6.10), que espera un lapso de tiempo de 250ms y sale de la aplicación.



**Figura 6.10: Diagrama de bloques de la pantalla de inicio de la interfaz HMI (Denegado)**

La pantalla diseñada para el monitoreo se muestra en la figura 6.11.



Figura 6.11: Panel Frontal de la pantalla monitoreo de la interfaz HMI

La pantalla realiza el monitoreo en cuatro secciones bien definidas que son:

- Monitoreo del canal virtual USB:
  - Direcciones asignadas a los pipes de lectura y escritura.
  - Paquetes ASCII que llegan al Buffer de lectura y de escritura.
  - Selección del tiempo de conmutación entre el escaneo de cada nodo sensor.
  - Visualización del nodo sensor actual con el que se estableció la comunicación.
- Monitoreo del estado de la batería: indicación gráfica estado de voltaje de cada batería de los nodos sensores.
- Monitoreo de las cinco variables del invernadero: humedad relativa, temperatura, CO<sub>2</sub>, luminosidad y humedad del suelo, a través de gráficos.
- Panel de alarmas en caso de sobrepasar los valores óptimos de alguna de las variables. A fin de que el operador del sistema adopte las acciones correctivas inmediatas. La tabla 6.6 muestra la matriz que se considero en el diseño del sistema de alarmas, en caso de presentarse casos de variables con valores fuera de sus rangos establecidos (Referencia tabla 2.2).

**Tabla 6.6: Eventos de alarmas y acciones correctivas**

<b>Variable</b>	<b>Evento de alarma</b>	<b>Rango</b>	<b>Acción correctiva</b>
Temperatura	Temperatura alta	$T > 25^{\circ}\text{C}$	Abrir ventanas laterales
Temperatura	Temperatura baja	$4^{\circ}\text{C} < T < 17^{\circ}\text{C}$	Cerrar las ventanas laterales
Temperatura	Temperatura baja - baja (Helada)	$T < 4^{\circ}\text{C}$	Activar los nebulizadores y el calefactor
Humedad del suelo	Humedad alta	$\text{HS} < 10\text{cB}$	Desactivar el sistema de riego por goteo
Humedad del suelo	Humedad baja	$\text{HS} > 20\text{cB}$	Activar el sistema de riego por goteo
Nivel de CO <sub>2</sub>	Nivel CO <sub>2</sub> alto	$\text{CO}_2 > 800\text{ppm}$	Abrir ventanas laterales
Nivel CO <sub>2</sub>	Nivel CO <sub>2</sub> bajo	$\text{CO}_2 < 400\text{ppm}$	Encender el calefactor
Nivel de iluminación	Nivel alto	$\text{ILUM} > 98\%$	Apagar las luminarias
Nivel de iluminación	Nivel bajo	$\text{ILUM} < 35\%$	Encender las luminarias

La programación del SUBVI de monitoreo inicia con la apertura de dos pipes: una para la lectura de datos y otra para la escritura de datos, mediante la función MPUSBOpen. (Figura 6.12).

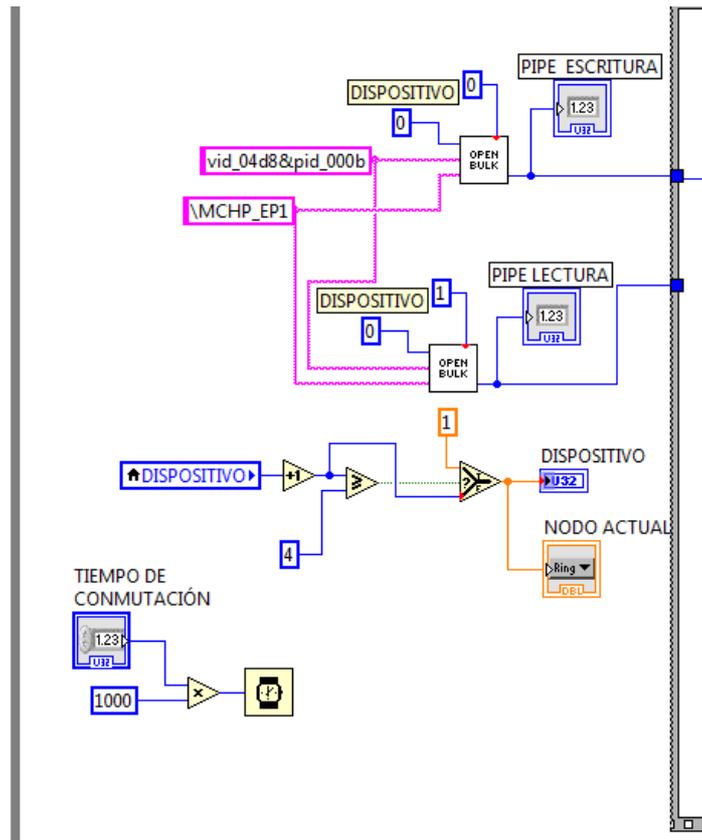


Figura 6.12: Apertura de pipes para lectura y para escritura

Posteriormente se configura un “Sequence Structure” con la siguiente lógica:

- **Secuencia 0:** abre el SUBVI de escritura (OPEN BULK) que contiene la función MPUSBWrite y escribe en el búfer de salida el número de nodo sensor con el que va a comunicarse y se define el valor de TIMEOUT. El diagrama de bloques correspondiente se muestra en la figura 6.13.

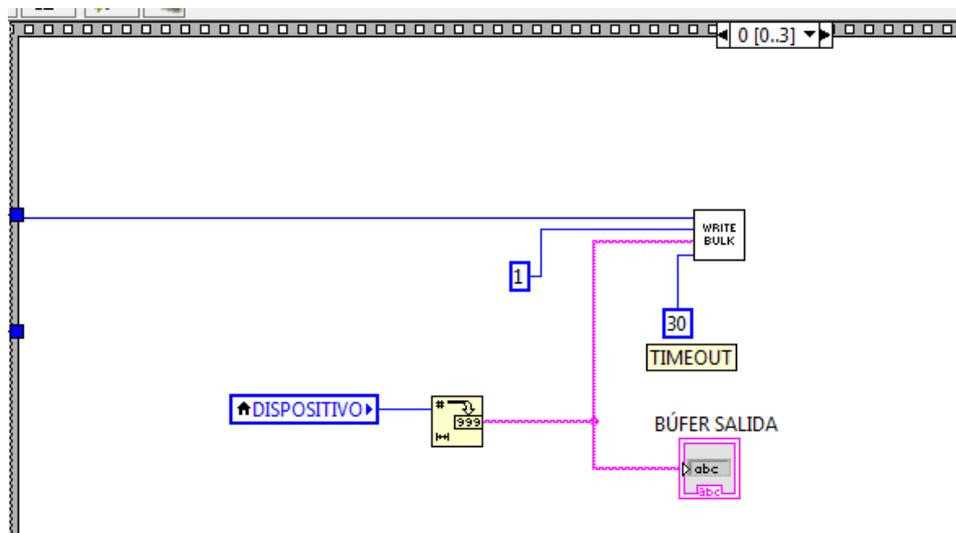


Figura 6.13: Programación de la secuencia de escritura

- **Secuencia 1:** abre el SUBVI de lectura (READ BULK) que contiene la función MPUSBRead. Para este SUBVI, es necesario establecer los bytes a recibir por cada paquete y el TIMEOUT, en el buffer de salida se tendrá la cadena de caracteres en forma de string (ver apartado 6.2 la codificación de cada paquete recibido).

Debido a que los datos vienen en forma de string y empaquetados, es necesario utilizar un SUBVI ADICIONAL (figura 6.14) que permita desempaquetar, procesar y organizar los datos leídos en el búfer.

Los datos una vez desempaquetados, son visualizados de forma gráfica y numérica.

Las salidas de cada dato desempaquetado, se somete a un proceso de comparación (en función de la tabla 6.6), para la generación de alarmas.

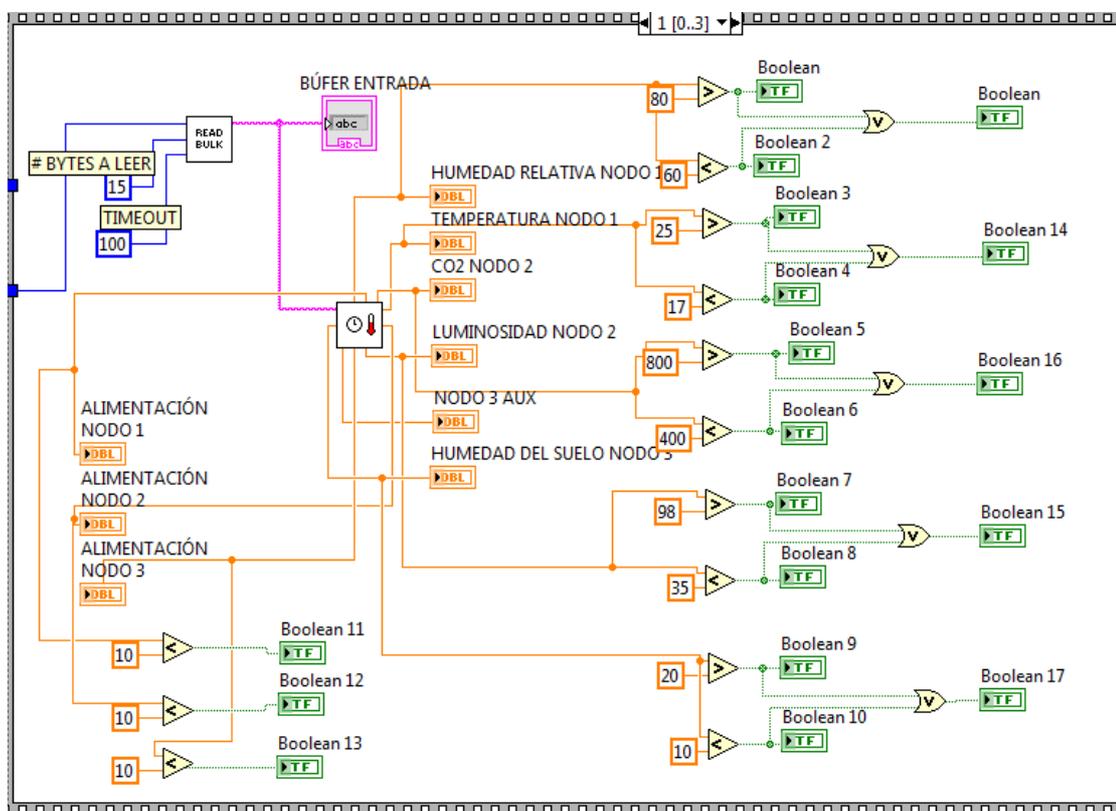


Figura 6.14: Programación de la secuencia de lectura de datos

El SUBVI para desempaquetar los datos se muestra en la figura 6.15. Para la obtención del valor final del dato, se considera las funciones de transferencia calculadas en el capítulo III y se suma 1023 debido a la resolución de 10 bits del microcontrolador utilizado en los nodos sensores.

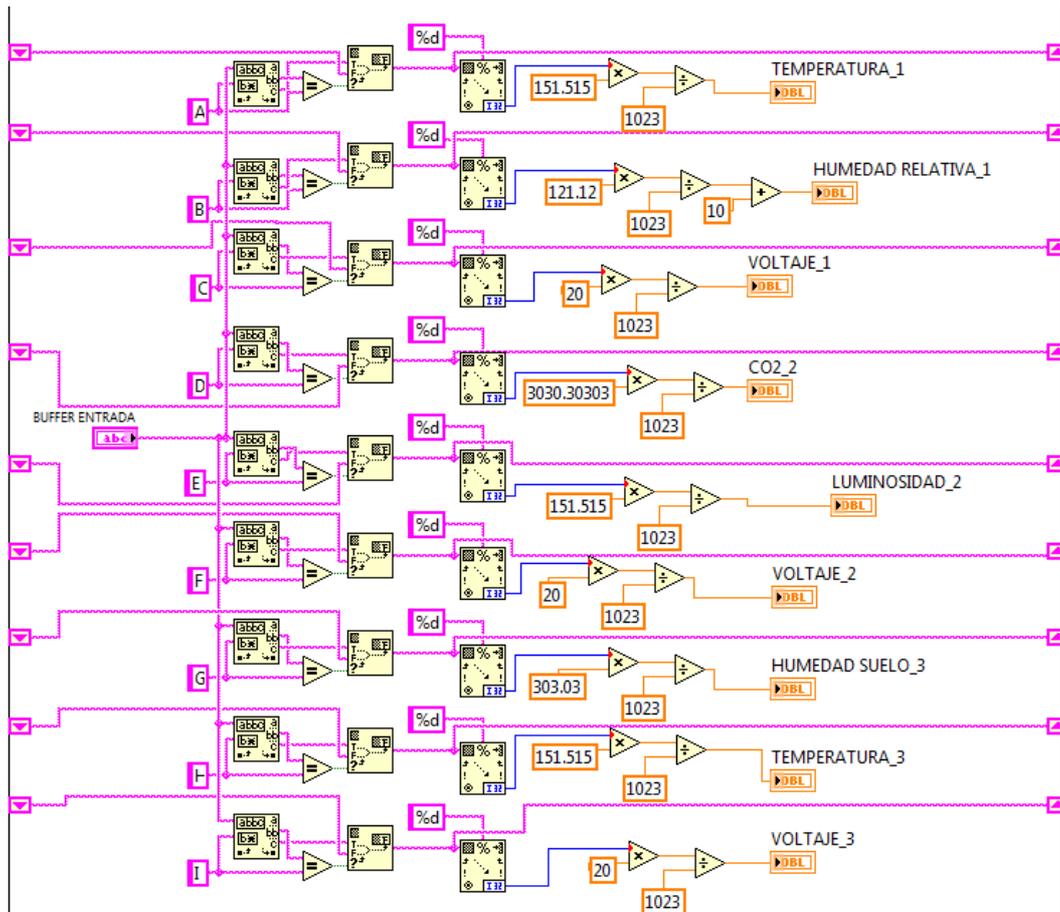


Figura 6.15: Programación del SUBVI para tratamiento de datos leídos

- **Secuencia 2 y 3:** abre el SUBVI de cierre de comunicación (CLOSE BULK) que contiene la función MPUSBClose. Para cerrar el pipe de escritura y lectura respectivamente.

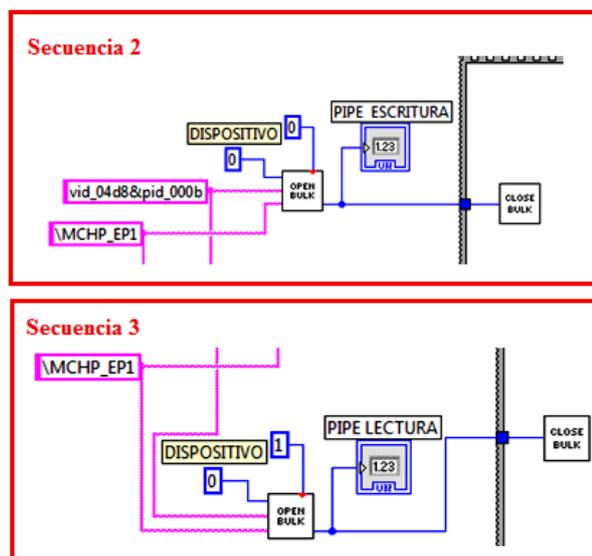


Figura 6.16: Programación de la secuencia de cierre de pipes

# **CAPÍTULO VII**

## **Puesta en marcha del sistema**

Considerando que el sistema propuesto es un prototipo que puede ser aplicado en un futuro en plantaciones florícolas de la zona central del Ecuador, se decidió instalar un invernadero de prueba que se encuentra ubicado en las instalaciones de la Escuela Politécnica del Ejército Extensión Latacunga de la provincia de Cotopaxi (figura 7.1).



**Figura 7.1: Vista exterior del prototipo de invernadero desarrollado**

Para comprobación del correcto funcionamiento del sistema de monitoreo propuesto para la optimización de los cultivos bajo invernadero, se realizó la siembra de rosas en el invernadero para observar la evolución del cultivo y así cumplir con las metas propuestas.

En primer lugar se preparó el terreno colocando abono orgánico, con el objetivo de que el terreno adquiera nutrientes que ayuden en el cultivo. En la figura 7.2 se muestra dicha actividad.



**Figura 7.2: Preparación del Terreno**

A continuación se procedió a realizar las camas y los caminos en el terreno, las dimensiones de las camas son: 60cm de ancho por 20cm de alto en toda la longitud del invernadero, las dimensiones de los caminos son: 70cm de ancho en toda la longitud del invernadero. La figura 7.3 se muestra la construcción de las camas y los caminos en el invernadero para continuar con la siembra de rosas.



**Figura 7.3: Construcción de las camas**

Como principal requisito para la siembra, es necesaria la instalación del riego por goteo en cada cama. Este riego me permite fertilizar a las plantas y humedecer el terreno. En la figura 7.4 se muestra la instalación del riego por goteo para el cultivo.



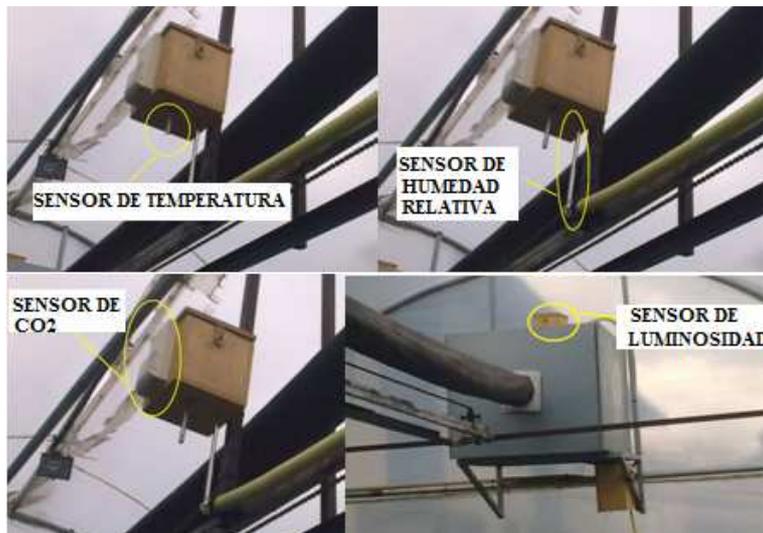
**Figura 7.4: Instalación del riego por goteo**

Finalmente se procedió con la siembra las rosas para iniciar el monitoreo de las variables y de esta manera mejorar la producción. La figura 7.5 se muestra la siembra de las rosas en el invernadero.



**Figura 7.5: Siembra de rosas**

Seguidamente se procedió a instalar los diferentes sensores, como se observa en la figura 7.6:

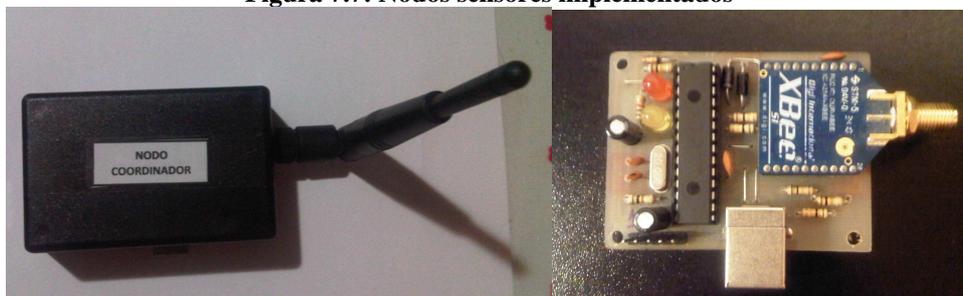


**Figura 7.6: Ubicación de los sensores**

Además de desarrolló 3 nodos sensores que estarán monitoreando las diferentes variables del invernadero y colocados en función de la ubicación de los sensores. Las placas PCB desarrolladas se muestran en las siguientes figuras.



**Figura 7.7: Nodos sensores implementados**

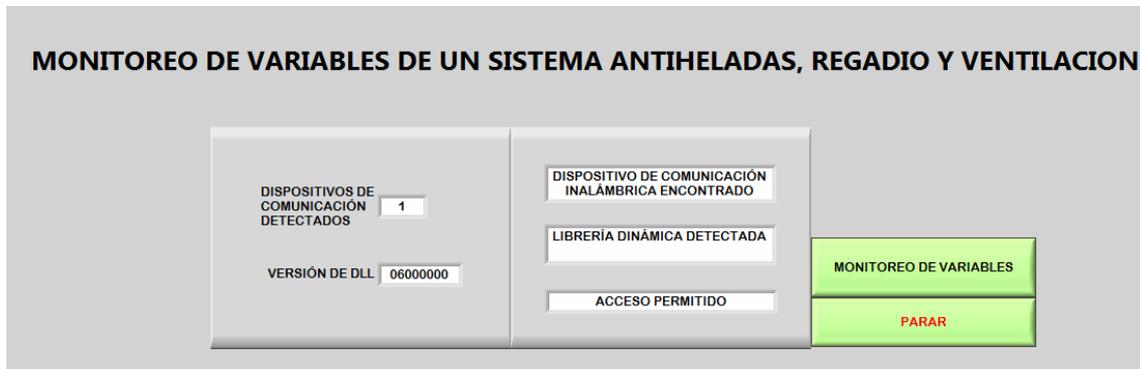


**Figura 7.8: Nodo coordinador (Dispositivo USB BULK) implementado**



**Figura 7.9: Baterías de los nodos sensores**

Las figuras 7.10 y 7.11 muestran el sistema HMI de monitoreo puesto en marcha.



**Figura 7.10: Puesta en marcha del sistema de monitoreo (Pantalla principal)**

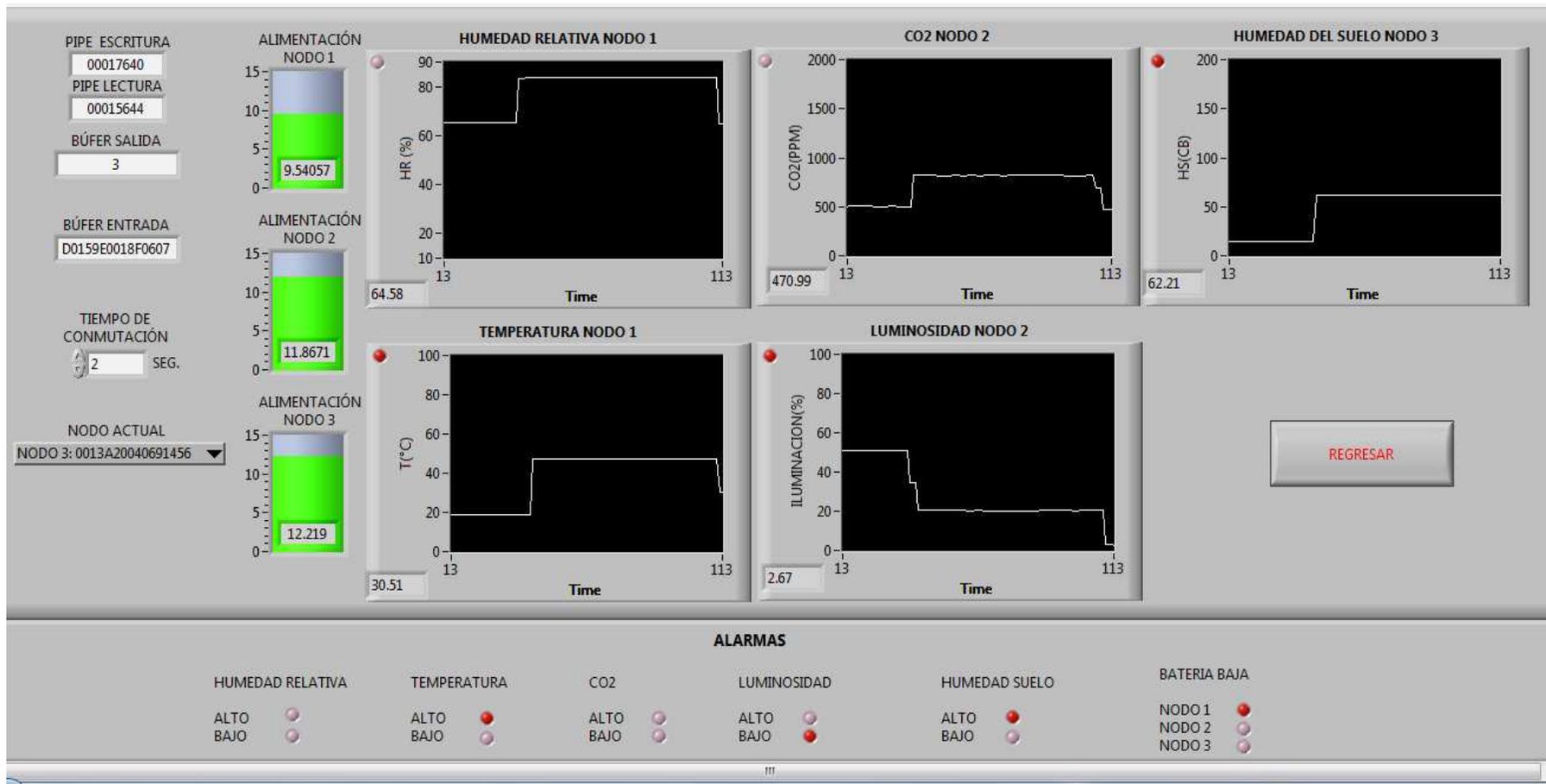


Figura 7.11: Puesta en marcha del sistema de monitoreo (Pantalla de visualización de datos)

# **CAPÍTULO VIII**

## **Conclusiones**

## 8.1 CONCLUSIONES

Las principales conclusiones ha las que se llegó una vez finalizado el proyecto propuesto, son las siguientes:

- Se ha desarrollado una red inalámbrica aplicando el estándar de comunicaciones 802.4.5 ZIGBEE, para el monitoreo de las variables físicas de: temperatura, humedad relativa, humedad del suelo, concentración de CO<sub>2</sub> y luminosidad; consideradas de gran importancia en el óptimo desempeño de los sistemas de: riego, ventilación y anti-heladas; de los cultivos bajo invernadero, a fin de contribuir al mejoramiento de la producción de los mismos.
- Se diseñó e implementó tres nodos sensores que cumplen el rol de dispositivos finales en la red inalámbrica, se encargan de adquirir la información de los diferentes sensores instalados en el invernadero, procesarlas a través del PIC6F88 y enviarlas vía UART al módulo XBEE 2.4 RF.
- Se diseñó e implementó un nodo coordinador, encargado de gestionar la información proveniente de cada nodo sensor, los datos recibidos son procesados y enviados vía USB modo de transferencia BULK al computador, a través del PIC18F2550.
- El nodo coordinador diseñado es un dispositivo USB BULK, al que se le desarrollo su propio controlador que permita el reconocimiento del mismo en el computador destinado al monitoreo. Para esto se utilizó librerías propias de MICROCHIP y se adaptó a las necesidades del proyecto.
- La pila del protocolo de ZIGBEE es más sencilla comparada con otros protocolos, ya que está implementada con cuatro capas bien definidas y además su configuración requiere menos código. Para el proyecto desarrollado, se ha trabajado únicamente en parte de configuración de las capas de red y de aplicación, ya que los módulos XBEE de MAXSTREAM utilizados, están diseñados para que las capas inferiores sean transparentes para el usuario.
- Considerando que las distancias entre los nodos sensores no supera los 10 metros y el modo de adquisición que se utilizó, se optó por una solución de comunicación remota basada en un equipo coordinador (NODO COORDINADOR) y equipos terminales (NODOS SENSORES). El equipo coordinador es el encargado de solicitar cada dos segundos información a los nodos sensores y recolectar los datos sensados por estos equipos terminales. Es decir que no fue necesario la configuración de un equipo ruteador que permita escalar a red de mayores alcances.
- De las pruebas de alcance realizadas con los módulos ZIGBEE XBEE S1 de MAXSTREAM, se determinó que cumplen satisfactoriamente con los requerimientos del sistema implementado, sin embargo, en el caso de que esta propuesta de monitoreo sea puesta en marcha en plantaciones florícolas cuyas área superan las decenas de hectáreas, será conveniente manejar dispositivos ZIGBEE

XBEE S2 PRO, cuyo alcance en exteriores supera los 1000 metros, así como también disponer de equipos que realizan las funciones de enrutadores.

- Las librerías dinámicas DLL de MICROCHIP para el manejo del puerto USB permiten la generación de un enlace virtual (pipe) para la comunicación entre el nodo coordinador y LABVIEW. Mediante la “pipe” generada la interfaz HMI realiza la conmutación para solicitar información a cada nodo sensor y a su vez recepta los datos que estos nodos enviarán de manera secuencial y ordenada.
- La interfaz de monitoreo desarrollada en LABVIEW, cumple con las funciones de monitoreo del canal virtual USB, monitoreo del estado de la batería mediante indicaciones gráficas estado de voltaje y monitoreo de las cinco variables del invernadero: humedad relativa, temperatura, CO<sub>2</sub>, luminosidad y humedad del suelo, a través de gráficos. Además incluye un panel de alarmas en caso de exceder los valores óptimos de alguna de las variables. A fin de que el operador del sistema adopte las acciones correctivas inmediatas.

## **8.2 TRABAJOS FUTUROS**

- El sistema implementado realiza el monitoreo de las variables físicas del invernadero, a futuro se debería incluir la etapa de control, que permita automatizar el manejo del invernadero, a fin de crear un microclima más eficiente que no dependa de acciones humanas en el caso de presentarse condiciones climáticas extremas que representen pérdida de la producción del cultivo.
- Los nodos sensores se encuentran alimentados por sistemas de baterías de 12Vcd, sin embargo considerando las excelentes condiciones de energía solar que dispone el Ecuador, debido a su ubicación geográfica, podría implementarse alguna solución suministro de energía a los nodos sensores a través del uso de paneles solares.

# Enlaces bibliográficos

[1] GUROVICH L., Fundamentos y Diseño de Sistemas de Riego. Editorial IICA, 1985, Costa Rica.

[2] FAO, Evapotranspiración del Cultivo. Editorial FIAT PANIS, 2000, Italia.

[3] COOPER WILLIAM HELFRICK ALBERT, Instrumentación Electrónica Moderna y Técnicas de Medición. Editorial Prentice Hall, 1991, México DF.

[4] CREÚS SOLÉ ANTONIO, Instrumentación Industrial. Sexta Edición, Alfaomega/Marcombo, 1990, México DF.

[5] CARACTERÍSTICAS SENSOR DWYER MODELO 657-1. Recuperado de: [http://www.dwyer-inst.com/PDF\\_files/657-1\\_IOM.pdf](http://www.dwyer-inst.com/PDF_files/657-1_IOM.pdf)

[6] CARACTERÍSTICAS SENSOR AIRSENSE 310E. Recuperado de: <http://www.enercorp.com/air/products/pdf/48.pdf>

[7] CARACTERÍSTICAS SENSOR WATERMARK, recuperado de: [http://www.seedmech.com/catalog.php?code=61&page=Modelos&product=101&product\\_name=Watermark&language=3](http://www.seedmech.com/catalog.php?code=61&page=Modelos&product=101&product_name=Watermark&language=3)

[8] CARACTERÍSTICAS PIC16F88, recuperado de: <http://www.ele-mariamoliner.dyndns.org/~fperal/lodi/9B-pic16f88.pdf>

[9] DATASHEET PIC16F88, recuperado de: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/30487c.pdf>

[10] DATASHEET LM35, recuperado de: <https://www.national.com/ds/LM/LM35.pdf>

[11] TUTORIAL EAGLE, recuperado de: [http://usuarios.tinet.cat/fmco/download/Paso\\_a\\_paso\\_detectores.pdf](http://usuarios.tinet.cat/fmco/download/Paso_a_paso_detectores.pdf)

[12] GIRÓN SOL MARÍA. Análisis técnico de redes sensoriales implementadas con el estándar ZIGBEE. Universidad de San Carlos de Guatemala. 2009. Recuperado de: [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_0229\\_EO.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0229_EO.pdf)

[13] ROMERO SUÁREZ IVÁN. Diseño de un sistema inalámbrico usando dispositivos ZIGBEE para el monitoreo de temperatura en la crianza de ovas y alevines en un centro de crianza. Pontificia Universidad Católica de Perú. 2010. Recuperado de: [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_0229\\_EO.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0229_EO.pdf)

- [14] CAPA MAC ZIGBEE, recuperado de:  
<http://www.info-ab.uclm.es/descargas/thechnicalreports/DIAB-06-09-2/TRBMAC.pdf>
- [15] DATASHEET MAX 232, recuperado de:  
<http://pdf1.alldatasheet.es/datasheet-pdf/view/27251/TI/MAX232.html>
- [16] OYARCE ANDRÉS. Guía de usuario XBEE Series 1. MIC Electrónica. Julio 2010. Recuperado de: [http://www.olimex.cl/pdf/Wireless/ZigBee/XBee-Guia\\_Usuario.pdf](http://www.olimex.cl/pdf/Wireless/ZigBee/XBee-Guia_Usuario.pdf)
- [17] DATASHEET PIC18F2550. Recuperado de:  
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39632e.pdf>
- [18] Un paseo por USB 2.0 MODOS DE TRANSFERENCIA DE DATOS USB. Soporte técnico OEM. FUJITSU España. Marzo 2003. Recuperado de:  
<http://www.fujitsu.com/downloads/EU/es/soporte/discosduros/UnpaseoporUSB-2.pdf>
- [19] LÓPEZ PÉREZ ERIC. El protocolo USB. PIPES USB. México D.F. Recuperado de: <http://www.i-micro.com/pdf/articulos/usb.pdf>
- [20] DATASHEET BATERÍA FIRSTPOWER. Recuperado de:  
<http://www.efirstpower.com/PDF/FP1212.pdf>
- [21] FUNCIONES DE LA LIBRERÍA DLL. Foros de Electrónica. Comunidad Internacional de Electrónica. Recuperado de:  
[www.forosdeelectronica.com/attachment.php?attachmentid=15556&d=1236010641](http://www.forosdeelectronica.com/attachment.php?attachmentid=15556&d=1236010641)