



**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO PARA
INVERNADEROS APOYADO CON TECNOLOGÍA ZIGBEE**

JUAN CARLOS SUÁREZ BARÓN

Proyecto de aplicación para optar por el título de Ingeniero Electrónico

Asesor/Director: FREDDY FERNANDO VALDERRAMA GUTIÉRREZ

Ingeniero Electrónico

UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA

UNAD

ESCUELA DE CIENCIAS BÁSICAS TECNOLOGÍA E INGENIERÍA

ZONA CENTRO BOYACÁ

DUITAMA

2013

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO PARA INVERNADEROS APOYADO CON TECNOLOGÍA ZIGBEE ©

Nota de aceptación:

Aprobado por el Comité de Grado
en cumplimiento de los requisitos
exigidos por la UNAD para optar
al título de Ingeniero Electrónico

Sandra Isabel Vargas López

JURADO

Duitama, 16 de Noviembre de 2013

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, hermanos y amigos, que siempre me han apoyado incondicionalmente.

El mayor placer en la vida es hacer lo que la gente te diga lo que no puedes hacer.

Walter Bagehot

Siempre sueña y apunta más alto de lo que sabes que puedes lograr.

William Faulkner

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO	8
ÍNDICE DE FIGURAS	11
INTRODUCCIÓN	9
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
Descripción del problema	10
Formulación del problema	10
JUSTIFICACIÓN	11
OBJETIVOS	12
Objetivo general	13
Objetivos específicos	13
ALCANCE Y DELIMITACIÓN	12
1. MARCO TEÓRICO E HISTÓRICO	14
1.1 REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS	14
1.2 ZIGBEE	15
1.2.1 Capas PHY y MAC.....	16
1.2.2 Capa de red (NWK).....	16
1.2.3 Capa de aplicación (APL)	16
1.2.4 Subcapa de soporte a la aplicación.....	17
1.2.5 Dispositivos Zigbee.....	18
1.3 FACTORES AMBIENTALES DENTRO DEL INVERNADERO	19
1.3.1 Temperatura.....	19
1.3.2 Humedad Relativa.....	20
1.3.3 Luz Ambiente	21
1.4 MARCO HISTÓRICO	22
1.4.1 Control y monitoreo industrial	22
1.4.2 Monitoreo del hábitat.....	23
1.4.3 Monitoreo de variables ambientales.....	25
1.4.4 Agricultura	25
1.4.5 Productos electrónicos.....	29
2. DESARROLLO DEL PROTOTIPO	30

2.1.	SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS	30
2.1.1	Sensores	30
2.1.2	Características y especificaciones generales de los sensores	30
2.1.3	Evaluación de sensores	45
2.1.4	Elección del sensor de temperatura	52
2.1.5	Elección del sensor de humedad relativa	53
2.1.6	Elección del sensor de luz	57
2.2	ESPECIFICACIONES DE DISEÑO	58
2.3	DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA	60
3.	DISEÑO DISPOSITIVO FINAL (NODO SENSOR).....	61
3.1	MÓDULO DE PROCESAMIENTO	62
3.1.1	Microcontrolador MC9S08JM16	62
3.2	MÓDULO DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA	63
3.3	MÓDULO DE SENSORES.....	65
3.4	MÓDULO DE ALIMENTACIÓN.....	65
3.5	DISEÑO DE LOS CIRCUITOS DEL DISPOSITIVO FINAL.....	65
3.5.1	Circuitos de alimentación.....	65
3.5.2	Circuitos sensores.....	67
3.5.3	Circuitos Microcontrolador	69
3.6	DISEÑO DE PCB.....	71
4.	DISEÑO DEL COORDINADOR	75
4.1	MÓDULO DE PROCESAMIENTO	76
4.1.1	Microcontrolador MC9S08JM60	76
4.2	MÓDULO DE ALIMENTACIÓN.....	77
4.3	MÓDULO DE DATA LOGGER.....	77
4.4	MÓDULO DE COMUNICACIÓN USB.....	77
4.5	DISEÑO DE LOS CIRCUITOS DEL COORDINADOR	82
4.5.1	Circuitos de alimentación	82
4.5.2	Circuitos comunicación USB.....	83
4.5.3	Circuitos Microcontrolador	84
4.5.4	Circuito módulo Xbee	86
4.5.5	Circuitos Data Logger	87
4.6	DISEÑO DE PCB.....	88

5.	COMUNICACIÓN ENTRE DISPOSITIVOS	92
5.1	SENSOR SHT71.....	92
5.1.1	Conversión a los valores físicos.	96
5.2	SENSORES DE LUZ, PRESIÓN Y ACELERÓMETRO	97
5.3	MÓDULOS XBEE	97
6.	DISEÑO DE ALGORITMOS Y SOFTWARE.....	100
6.1	DISEÑO DEL SOFTWARE DEL NODO SENSOR.....	100
6.2	DISEÑO DEL SOFTWARE DEL COORDINADOR	102
7.	DISEÑO DE LA INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO.....	103
8.	PRUEBAS Y RESULTADOS.....	105
8.1	IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA	105
8.2	PRUEBAS DE CONECTIVIDAD	105
8.2.1	Descripción de las pruebas y resultados.....	105
8.3	PRUEBAS DE COMPARACIÓN DE MEDIDAS	109
8.3.1	Resultados de la prueba de temperatura y humedad relativa	109
8.4	PRUEBAS DE COMUNICACIÓN DE DATOS.....	112
8.4.1	Prueba con línea de vista (Outdoor).....	113
8.4.2	Prueba sin línea de vista (Indoor).....	115
	CONCLUSIONES	117
	RECOMENDACIONES.....	118
	REFERENCIAS.....	119

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Dispositivo autónomo de una red de sensores inalámbricos	14
Figura 2. Clasificación de las redes inalámbricas.	15
Figura 3. Capas del protocolo Zigbee	15
Figura 4. Topologías de red: estrella, árbol y malla	16
Figura 5. Capa de aplicación	17
Figura 6. Relación entre dispositivos del estándar IEEE 802.15.4 y dispositivos Zigbee.	18
Figura 7. Espectro de la radiación visible y longitudes de onda asociadas al mismo.....	21
Figura 8. Arquitectura de un sistema de lectura automática de medidores (AMR).....	23
Figura 9. Instalación de los nodos sensores en la isla Great Duck	24
Figura 10. Arquitectura de red del sistema de control de riego	26
Figura 11. Esquema propuesto de un sistema de riego controlado con tecnología Zigbee	27
Figura 12. Red de sensores inalámbrica con topología de malla usada en el monitoreo de variables ambientales presentes en un viñedo.	28
Figura 13. Implementación de la red de adquisición de datos usando los dispositivos MPWiNodeZ en un entorno de viticultura de precisión.	28
Figura 14. Comunicación punto a punto del sistema de monitoreo de una tabla de surf.	29
Figura 15. Rango y alcance.....	32
Figura 16. Diferencia entre exactitud y precisión.	33
Figura 17. Repetibilidad	34
Figura 18. Curva de histéresis.....	34
Figura 19. Zona muerta.	35
Figura 20. Linealidad.	36
Figura 21. Tipos de linealidad. a) Independiente; b) Ajustada a cero; c) Terminal; d) A través de los extremos; e) Teórica.	36
Figura 22. Curva de calibración.....	37
Figura 23. Potenciómetro lineal como sensor de posición.	39
Figura 24. Función de transferencia que relaciona la salida con la entrada	39
Figura 25. Tiempo de retardo y tiempo de subida y tiempo de subida.....	41
Figura 26. Tiempo de respuesta.....	41
Figura 27. Constante de tiempo.	42

Figura 28. Tiempo de establecimiento.	42
Figura 29. (a). Sistema sobreamortiguado, (b) Sistema subamortiguado, (c) Sistema con amortiguamiento crítico.....	43
Figura 30. Sistema de segundo orden subamortiguado.....	44
Figura 31. Etapas del acondicionamiento de señal.	45
Figura 32. Sensor de humedad relativa y temperatura SHT71.	55
Figura 33. Diagrama de bloques del sensor SHT71.....	55
Figura 34. Graficas de comportamiento para la medición de humedad relativa y temperatura del sensor SHT71.....	56
Figura 35. Sensor LX1972.....	57
Figura 36. Curva característica (izquierda) y respuesta espectral vs longitud de onda (derecha).	58
Figura 37. Diagrama esquemático del sistema.....	60
Figura 38. Diagrama de bloques del nodo sensor.	61
Figura 39. Diagrama de bloques del microcontrolador MC9S08JM16.....	63
Figura 40. Módulos Xbee XB24-AWI-001.	64
Figura 41. Circuito de alimentación por medio de batería de 9V y regulación (L1117).	66
Figura 42. Circuito de alimentación por medio del conector USB serie B y regulación a 3.3v.....	66
Figura 43. Interruptor de encendido para seleccionar el voltaje del conector USB serie B.	67
Figura 44. Circuito de conexión del sensor SHT71.....	67
Figura 45. Circuito de conexión del sensor LX1972.	68
Figura 46. Circuito de conexión del acelerómetro MMA7361L y del sensor de presión MPXV5010G respectivamente.....	68
Figura 47. Circuito de conexión del cristal externo del microcontrolador MC9S08JM16... ..	69
Figura 48. Circuito esquemático de conexión del microcontrolador MC9S08JM16 integrado al nodo sensor.....	69
Figura 49. Circuito esquemático de conexión del conector BDM personalizado y pulsadores de propósito general, respectivamente.....	70
Figura 50. Circuito de conexión del módulo Xbee del nodo sensor.	70
Figura 51. Capa de serigrafía de información de conexiones de la PCB.....	72
Figura 52. Capa superior o top layer.	72
Figura 53. Serigrafía de la capa inferior o bottom layer.	73
Figura 54. Capa inferior o bottom layer.	73
Figura 55. Descripción de los componentes de la capa superior del nodo sensor.....	74

Figura 56. Descripción de los componentes de la capa inferior.	74
Figura 57. Diagrama de bloques del coordinador.	75
Figura 58. Diagrama de bloques del microcontrolador MC9S08JM60.	76
Figura 59. Diagrama de bloques del FT2232D	79
Figura 60. Pines del encapsulado LQFP y esquemático del FT2232D.....	80
Figura 61. Circuito de alimentación por medio del conector USB serie B y regulación a 3.3v.....	82
Figura 62. Interruptor de encendido para seleccionar el voltaje del conector USB serie B.	83
Figura 63. Circuito esquemático del FT2232D para generar virtual com.	84
Figura 64. Conexión de los pines USBDM, USBDP y RSTOUT# al conector miniusb.	84
Figura 65 Circuito esquemático de conexión del microcontrolador MC9S08JM60 integrado al coordinador.....	85
Figura 66. Conector de expansión J2 y conexión del oscilador externo del microcontrolador MC9S08JM60.....	85
Figura 67 Circuito esquemático de conexión del conector BDM personalizado y conector de expansión J1, respectivamente.....	86
Figura 68. Circuito de conexión del módulo Xbee del nodo sensor.	86
Figura 69. Conexión de la LCD y el zumbador al microcontrolador.	87
Figura 70. Circuito de conexión de los pulsadores del data logger.	87
Figura 71. Conexión de la tarjeta SD al módulo SPI del microcontrolador.	88
Figura 72. Capa de serigrafía de información de conexiones de la PCB.....	89
Figura 73. Capa superior o top layer.	89
Figura 74. Serigrafía de la capa inferior o bottom layer.	90
Figura 75. Capa inferior o bottom layer.	90
Figura 76. Descripción de los componentes de la capa superior del coordinador.....	91
Figura 77. Descripción de los componentes de la capa inferior.	91
Figura 78. Conexión del sensor SHT71 con el microcontrolador.	92
Figura 79. Secuencia de inicio de transmisión.....	93
Figura 80. Ejemplo de una secuencia de medida de humedad relativa.....	94
Figura 81. Secuencia de reinicio de comunicación.....	94
Figura 82. Diagrama de flujo de las secuencias para obtener medidas del sensor SHT71	95
Figura 83. Configuración del módulo XBEE transmisor.....	99
Figura 84. Configuración del módulo XBEE receptor	99

Figura 85. Algoritmo para la inicialización del ADC.	100
Figura 86. Diagrama de flujo del programa del nodo sensor.	101
Figura 87. Diagrama de flujo del programa del coordinador.	102
Figura 88. Configuración del puerto serial (VISA Configure Serial Port).	103
Figura 89. Panel Frontal.	104
Figura 90. Diagrama de bloques.	104
Figura 91. Planta 1 y de la prueba resultados visualizados en la LCD.	106
Figura 92. Planta 2 y de la prueba resultados visualizados en la LCD.	107
Figura 93. Comparación de los resultados experimentales del sensor SHT71 alrededor de dos plantas.	109
Figura 94. Comparación de los resultados experimentales del sensor de temperatura SHT71 y la estación meteorológica Kestrel 4500.	111
Figura 95. Comparación de los resultados experimentales del sensor de humedad relativa SHT71 y la estación meteorológica Kestrel 4500.	112
Figura 96. Placa de desarrollo USB de Xbee.	113
Figura 97. Diagrama para prueba con línea de vista.	113
Figura 98. Medida de recepción de paquetes y RSSI a 30 m	114
Figura 99. Medida de recepción de paquetes y RSSI a 60 m	114
Figura 100. Medida de recepción de paquetes y RSSI a 100 m	115
Figura 101. Lugar de instalación de los equipos para prueba sin línea de vista.	116
Figura 102. Medida de recepción de paquetes y RSSI para Prueba 1.	116

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Exigencias de temperatura para distintas especies.....	20
Tabla 2. Características estáticas y dinámicas de los sensores.	31
Tabla 3. Salida de un sistema de primer orden frente a distintas entradas múltiples.	40
Tabla 4. Características estáticas y dinámicas e los sensores de humedad relativa.	47
Tabla 5. Principio de funcionamiento y acondicionamiento de señal de los sensores capacitivos de humedad relativa.	47
Tabla 6. Principio de funcionamiento y acondicionamiento de señal de los sensores capacitivos de humedad relativa.	48
Tabla 7. Características estáticas y dinámicas e los sensores de luz.	48
Tabla 8. Principio de funcionamiento y acondicionamiento de señal de los sensores de luz.	49
Tabla 9. Características estáticas y dinámicas e los sensores de temperatura.....	50
Tabla 10. Principio de funcionamiento y acondicionamiento de señal de los termopares.	50
Tabla 11. Principio de funcionamiento y acondicionamiento de señal de los termopares.	51
Tabla 12. Comparación de diferentes sensores de humedad relativa y temperatura	54
Tabla 13. Especificaciones de desempeño para la medición de temperatura.	56
Tabla 14. Especificaciones de desempeño para la medición de humedad relativa..	56
Tabla 15. Características de los módulos Xbee y Xbee Pro de la serie 1.....	64
Tabla 16. Medidas de componentes de montaje superficial SMD.....	71
Tabla 17. Definición de pines de los canales A y B	80
Tabla 18. Pines de la interfaz eléctrica.....	81
Tabla 19. Pines de la interfaz USB.....	81
Tabla 20. Pines del oscilador externo de 6 MHz, de test, modo suspendido y de reset.	81
Tabla 21. Pines de la interfaz con la EEPROM.....	82
Tabla 22. Lista de comandos del sensor SHT71	93
Tabla 23. Coeficientes de conversión de humedad relativa	96
Tabla 24. Coeficientes de compensación de temperatura.....	96
Tabla 25. Coeficientes de conversión de temperatura.	97

Tabla 26. Resultados de las pruebas en el escenario 1.	108
Tabla 27. Comparación de medidas de temperatura y humedad relativa entre SHT71 y Kestrel 4500.....	110

INTRODUCCIÓN

Este trabajo presenta el diseño y desarrollo de un prototipo de una red inalámbrica de sensores (WSN, wireless sensor network) basada en el estándar Zigbee. El dispositivo desarrollado permite conectar múltiples dispositivos inalámbricos para transmitir datos sobre las variables ambientales de humedad relativa y temperatura; el cual puede ser usado en invernaderos y en otras aplicaciones que requieran la medición de dichas variables.

En el capítulo 1 se presenta un marco referencial que aborda los aspectos teóricos y conceptuales relevantes en la temática del estándar Zigbee, sus tipos de dispositivos y redes. Un estado del arte, en el que se describen diversos campos de aplicación como control y monitoreo industrial, monitoreo del hábitat, monitoreo de variables ambientales, agricultura y productos electrónicos. Adicionalmente se presentan los parámetros que influyen sobre medio ambiente dentro de un invernadero: humedad relativa, luz ambiente y temperatura.

El capítulo 2 trata sobre el desarrollo del prototipo. Se presentan los sensores que se utilizan para medir los diferentes parámetros climáticos y la metodología utilizada para la selección del sensor a partir de consideraciones como tipo de tecnología y características.

El capítulo 3 y el capítulo 4 tratan sobre el diseño del dispositivo final (nodo sensor) y del coordinador basado en la teoría de Zigbee, respectivamente. Este tema de diseño se explica cómo se alimentan los dispositivos y los circuitos desarrollados para cada uno, junto al diseño detallado de los circuitos impresos (PCB) desarrollados para el proyecto.

El capítulo 5 presenta el desarrollo de la comunicación entre los sensores y módulos de comunicación Zigbee con los microcontroladores Freescale de cada dispositivo, y a su vez estos últimos entre sí. El capítulo 6 describe mediante la representación a través de diagramas de flujo de los programas diseñados y escritos para los microcontroladores. El capítulo 7 describe el diseño la interfaz gráfica de usuario (GUI) desarrollada por medio de instrumentos virtuales de Labview que visualiza la lectura de de las variables. En el capítulo 8 se desarrolla toda la experimentación realizada durante la ejecución del proyecto: pruebas de comunicación, y comparación de las medidas con un patrón.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Descripción del problema

Los estudios de monitoreo en ambientes controlados evidencian la necesidad de medir las variables ambientales bajo condiciones físicas reales, o en condiciones bajo equipos específicos. Lo anterior requiere el empleo de sensores, y en muchas ocasiones la implementación y el cableado de estos resulta costoso, inclusive en tiempo. El problema es mayor cuando se pretende realizar alguna medición en un sistema ya implementado, ya que esto podría requerir el recableado y relocalización de los dispositivos de medición.

Las redes actuales se basan en el cableado estructurado que está definido para empresas y oficinas, las cuales no cumplen con los requerimientos del trabajo bajo condiciones ambientales agresivas experimentadas en los invernaderos o similares. Algunas de estas características que facilitan que otros tipos de arquitecturas tales como la escalabilidad de la red, limitada por el tipo de red y las características propias de los dispositivos utilizados en el invernadero son condiciones críticas e importantes para el desarrollo de la red y para su ampliación.

Formulación del problema

El presente trabajo consiste en el diseño y desarrollo de una red inalámbrica de sensores basada en el protocolo Zigbee, que proporciona todas las características de un sistema alambrado, sin las limitantes que tienen dichos sistemas.

Por lo anterior se puede formular la siguiente pregunta de investigación:

¿Es posible monitorear variables ambientales en un invernadero a través de una red inalámbrica de sensores con tecnología Zigbee?

JUSTIFICACIÓN

Este proyecto se apoya en el desarrollo de un prototipo de sistema de monitoreo de variables ambientales; que se aplica en un entorno simulado de invernadero. El sistema aplica el protocolo de comunicaciones Zigbee el cual permite la comunicación entre nodos tanto emisores como receptores; sus módulos consumen muy poca energía ya que cuando no se están usando entran en modo de bajo consumo de forma automática, y dado que en la aplicación realizada no se maneja un gran volumen de datos resulta el protocolo que más se adapta a las necesidades sistema.

El uso y aplicación de Zigbee facilita el proceso de monitoreo de distintos parámetros, permite la reubicación de sensores, dispositivos de transmisión, almacenamiento y procesamiento en lugares remotos sin tener que emplear algún tipo de cableado; esta tecnología permite el cambio de lugar sin afectar su desempeño y configuración.

El sistema posibilita monitorear las variables ambientales de humedad relativa y temperatura, ya que son dos variables importantes en invernaderos, por cuanto son características altamente influyentes dentro de este ambiente. Adicionalmente en una etapa de producción facilitará al usuario final ver el comportamiento de estas variables, y en una etapa posterior poder ser controladas.

El proyecto se desarrolló como parte del trabajo de grado en ingeniería electrónica en la UNAD dentro de la línea de investigación de sistemas electrónicos aplicados al sector agropecuario. El área de aplicación se consideró porque siendo Boyacá un departamento agrícola, es importante proveerle con desarrollos tecnológicos que mejoren las condiciones técnicas y optimizar recursos.

ALCANCE Y DELIMITACIÓN

Se construyó un modelo a escala que puede representar y dar un acercamiento a un sistema real de monitoreo de variables ambientales. Este prototipo permite ver la funcionalidad de lo que puede ser un sistema real en producción o producto final; ya que no lleva a cabo la totalidad de las funciones necesarias del sistema final. El objetivo en esta fase es dar los primeros pasos hacia una posible construcción industrial y que el prototipo proporcione una retroalimentación temprana por parte de los usuarios acerca de lo que sería un sistema final.

En el desarrollo del prototipo se llega al diseño y construcción de un dispositivo final (nodo sensor) y un dispositivo coordinador (receptor); estos nodos permiten y facilitan la interacción con un sensor integrado digital el cual es capaz de medir en su conjunto humedad relativa y temperatura, estos elementos interconectados conforman una red de topología estrella y a su vez una red ad-hoc.

Las variables que se trabajaron en el desarrollo del proyecto fueron humedad relativa y temperatura. Se tomaron porque se consideran elementos clave en el ambiente de un invernadero; su monitoreo en el prototipo produce dos escenarios que comúnmente se deben medir y por ello se tomaron en cuenta; adicional a ello, el estudio de la clasificación y selección de sensores va ligado a este aspecto.

Se realizaron pruebas que permitieron verificar el funcionamiento y calibración del sistema en las instalaciones de un ambiente simulado de invernadero de la Escuela Colombiana de Carreras Industriales (ECCI); el cual es un escenario que pertenece a la facultad de ingeniería ambiental y que cuenta con los espacios ideales para la realización de los experimentos¹.

¹ <https://www.youtube.com/watch?v=MUXvD4eHQ>

OBJETIVOS

Objetivo general

Desarrollar un prototipo de sistema de monitoreo de variables ambientales en invernaderos mediante redes inalámbricas de tipo Zigbee.

Objetivos específicos

- Diseñar y construir el dispositivo final Zigbee para lectura remota de medidas en el invernadero.
- Adaptar y configurar el dispositivo concentrador (coordinador) para visualización de variables y detección de alarmas sobre las lecturas en el invernadero.
- Desarrollar una interfaz gráfica de usuario para visualizar las variables en el PC.
- Elaborar un estudio de clasificación y selección de sensores de variables ambientales.

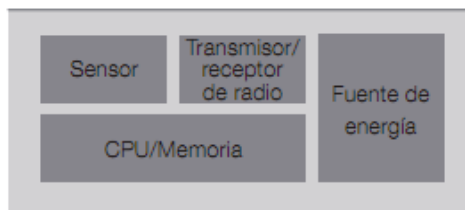
1. MARCO TEÓRICO E HISTÓRICO

1.1 REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS

“Un sistema WSN (Wireless Sensor Network) de sensores inalámbricos es una red con numerosos dispositivos distribuidos espacialmente, que utilizan sensores para controlar diversas condiciones en distintos puntos, entre ellas la temperatura, el sonido, la vibración, la presión y movimiento o los contaminantes. Los dispositivos, denominados nodos, son unidades autónomas que constan de un microcontrolador, una fuente de energía (casi siempre una batería), un radio transceptor y un elemento sensor”².

La figura 1 presenta el diagrama de bloques de un dispositivo autónomo de una red de sensores inalámbricos.

Figura 1. Dispositivo autónomo de una red de sensores inalámbricos



Fuente: (Adam, Frey 2006)

Las redes inalámbricas constituyen un sistema de comunicación de datos flexible que permite reemplazar las redes cableadas o expandirlas. En este tipo de redes los datos se propagan en un medio de transmisión no guiado mediante ondas electromagnéticas a través de antenas. El uso de estas tecnologías de radiofrecuencia permite a los usuarios acceso a las redes dentro del área de cobertura y minimiza las conexiones cableadas. Las redes inalámbricas se pueden clasificar según la cobertura y el ancho de banda, la cuales se dividen en 4 grupos:

WWAN: Red inalámbrica de área amplia (Wireless Wide Area Network).

WMAN: Red inalámbrica de área metropolitana (Wireless Metropolitan Area Network).

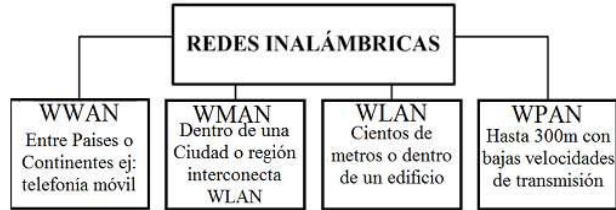
WLAN: Red inalámbrica de área local (Wireless Local Area Network).

WPAN: Red inalámbrica de área personal (Wireless Personal Area Network).

² ADAM, N. and FREY, J., 2006, Redes de sensores inalámbricos. Nuevas soluciones de interconexión para la automatización industrial. *Revista ABB*. 2006. Vol. 2.

La figura 2 muestra un cuadro de clasificación de las redes inalámbricas.

Figura 2. Clasificación de las redes inalámbricas.

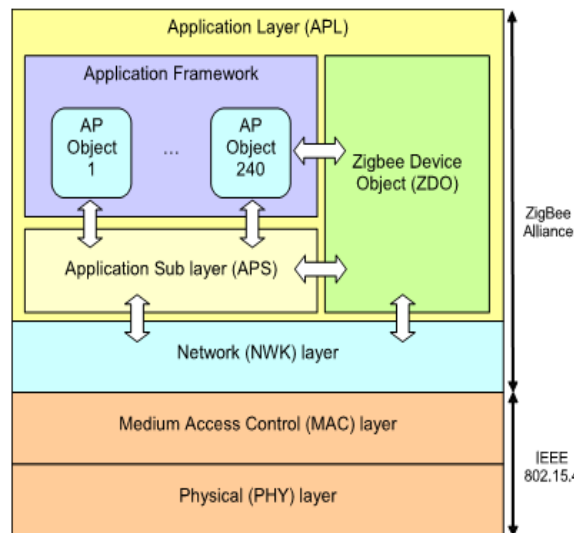


Fuente: (Alfonso Sánchez 2009)

1.2 ZIGBEE

Zigbee es un estándar desarrollado por la Zigbee Alliance³, que define un conjunto de protocolos de comunicación para redes inalámbricas con tasas bajas de transmisión de datos y de corto alcance. Zigbee está basado en el estándar IEEE 802.15.4 y define el hardware y el software, el cual ha sido descrito en los términos de conexión de redes, como la capa físicas (PHY), y la capa de control de acceso al medio (MAC). La alianza Zigbee ha añadido las especificaciones de las capas red (NWK) y aplicación (APL) para completar lo que se llama la pila o stack Zigbee. La figura 3 muestra las capas que conforman Zigbee. A continuación presentamos una breve descripción de cada una de las capas:

Figura 3. Capas del protocolo Zigbee



Fuente: (Baronti, Pillai, Chook, Chessa, Gotta, Hu 2007)

³ ALLIANCE, ZigBee, 2006, ZigBee specification. Document 053474r06, Version. 2006. Vol. 1.

1.2.1 Capas PHY y MAC

La capa de más bajo nivel es la capa física (PHY), que en conjunto con la capa de acceso al medio (MAC), brindan los servicios de transmisión de datos por el aire, punto a punto. Estas dos capas están descritas en el estándar IEEE 802.15.4–2003.

1.2.2 Capa de red (NWK)

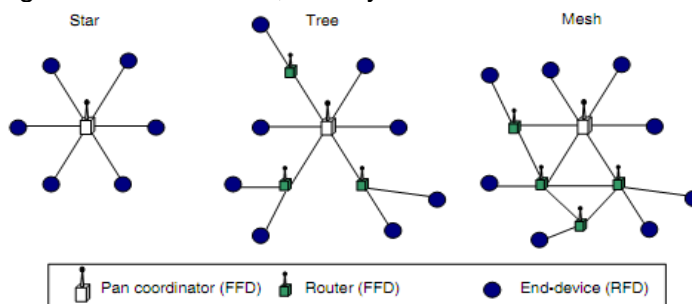
Esta capa actúa como interfaz entre la capa MAC y la capa aplicación. Esta capa es la responsable de iniciar la red, unirse a la red, enrutar paquetes dirigidos a otros nodos en la red, proporcionar los medios para garantizar la entrega del paquete al destinatario final, filtrar paquetes recibidos, cifrarlos y autentificarlos. Por lo tanto, esta capa implementa seguridad y encamina tramas a sus respectivos destinos.

Cabe destacar que la capa de red del controlador de red es la responsable de crear una nueva red y asignar direcciones a los dispositivos de la misma.

Por último, cabe señalar que esta es la capa donde están implementadas las diferentes topologías de red (mostradas en la figura 4) que soporta Zigbee:

- Topología en estrella: el coordinador se sitúa en el centro.
- Topología en árbol: el coordinador es la raíz del árbol.
- Topología de malla: al menos uno de los nodos tiene más de dos conexiones.

Figura 4. Topologías de red: estrella, árbol y malla



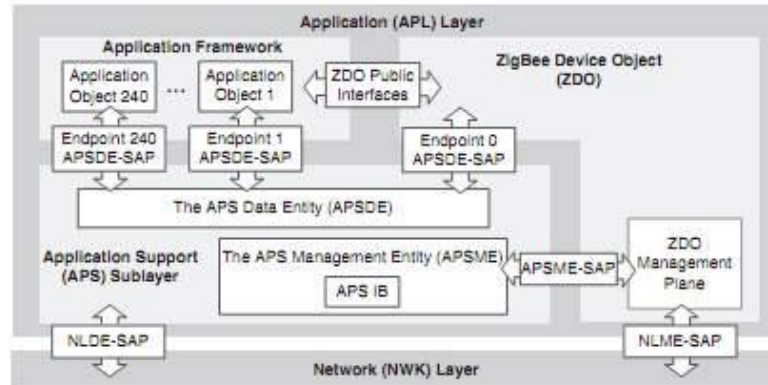
Fuente: (Baronti, Pillai, Chook, Chessa, Gotta, Hu 2007)

1.2.3 Capa de aplicación (APL)

La capa de aplicación es la más alta del protocolo inalámbrico Zigbee. Esta la capa de la que se encargan los fabricantes, donde se encuentran los ZDO (ZigBee Device Objects) que se encargan de definir el papel del dispositivo en la red.

La capa de aplicación (APL) de Zigbee consiste de tres secciones (Figura 5). La subcapa de aplicación de soporte (APS), objeto de dispositivo Zigbee (ZDO) y estructura de aplicación (application framework) Zigbee.

Figura 5. Capa de aplicación



Fuente: (Farahani 2011)

1.2.4 Subcapa de soporte a la aplicación

La subcapa de soporte a la aplicación (APS) provee una interfaz entre la capa de red (NWK) y la capa de aplicación. Esta subcapa, similar a las capas inferiores, soporta dos tipos de servicios: datos y gestión. El servicio de datos APS es proporcionado por la entidad de datos (ASPDE) y se accede a través del punto de acceso de servicio de ASP (SAP). Dentro de las capacidades de gestión son ofrecidas por la entidad de gestión de ASP (APSME) y es accedida a través de APSM-SAP. Las responsabilidades de la subcapa de soporte a la aplicación son:

- Mantener tablas de vinculación de nuevos dispositivos.
- Reenviar mensajes entre los dispositivos vinculados en la red.
- Administrar direcciones de grupo.

▪ Estructura de aplicación

Application Framework es el ambiente en cual los objetos de aplicación están organizados para controlar y gestionar las capas del protocolo en un dispositivo Zigbee.

Los objetos de aplicación son desarrollados por los fabricantes y es acá donde el dispositivo es personalizado para varias aplicaciones, donde puede haber cerca de 240 objetos de aplicación para cada dispositivo. Cada objeto de aplicación tiene una única dirección de punto final (endpoint 1 a endpoint 240). La dirección de endpoint cero es usada para el objeto de dispositivo Zigbee ZDO.

▪ Objetos de dispositivo Zigbee ZDO (Zigbee Device Objeto)

Los objetos de dispositivo Zigbee (ZDO) proveen una interfaz entre la subcapa APS y la estructura de aplicación. El ZDO actúa como interfaz entre la sub-capas de aplicación APS y la estructura de la aplicación. El ZDO tiene la responsabilidad de inicializar la APS, la capa NWK y el proveedor de servicio de seguridad SSP (Security Service Provider).

El ZDO contiene las funcionalidades comunes en una aplicación que opera el stack del protocolo Zigbee. Por ejemplo, es responsabilidad del ZDO configurar el dispositivo como uno de los tres posibles tipos lógicos de coordinador Zigbee, router Zigbee o dispositivo final Zigbee. El ZDO usa primitivas para llevar a cabo sus funciones y acceder a la entidad de gestión de la subcapa APS vía APSME-SAP.

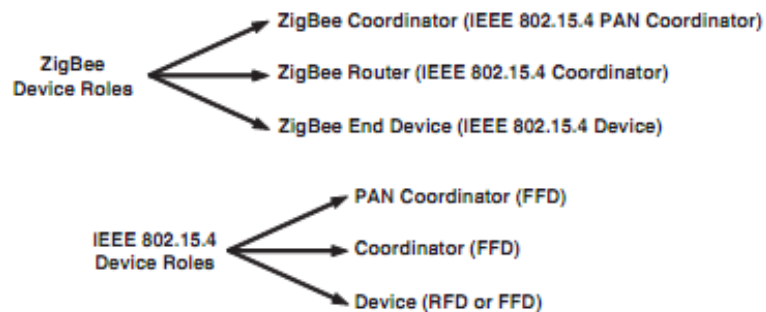
1.2.5 Dispositivos Zigbee.

En una red IEEE 802.15.4 existen dos tipos de dispositivos: FFD y RFD.

El estándar Zigbee usa una terminología ligeramente diferente, generando más tipos de dispositivos basados en la descripción de IEEE 802.15.4.

La figura 6 describe la relación entre dispositivos del estándar IEEE 802.15.4 y dispositivos Zigbee. Un coordinador Zigbee (ZC) es un coordinador PAN IEEE 802.15.4. Un router Zigbee (ZR) es un dispositivo que puede actuar como un coordinador IEEE 802.15.4. Un dispositivo final Zigbee (ZED) es un dispositivo que no es coordinador ni router⁴.

Figura 6. Relación entre dispositivos del estándar IEEE 802.15.4 y dispositivos Zigbee



Fuente: (Farahani 2011)

- **Coordinador Zigbee**

El Coordinador Zigbee cuenta con las siguientes funciones:

- Iniciar la Red.
- Seleccionar el PAN ID (Identificador de Red de Area Personal) para la red.
- Permitir a los dispositivos ingresar o dejar la red.
- Ejecutar todas las funciones del router Zigbee.
- Servir como centro de seguridad en una red con seguridad.

- **Router Zigbee**

El Router Zigbee (ZR) tiene las siguientes funciones:

⁴ FARAHANI, Shahin, *ZigBee Wireless Networks and Transceivers*. Newnes, 2011, 365p. ISBN 9780080558479.

Enrutar datos entre dispositivos Zigbee.
Permitir a los dispositivos ingresar o dejar la red.
Manejar los mensajes para los dispositivos finales hijos.
Opcionalmente ejecutar todas las funciones de los dispositivos finales.

▪ **Dispositivo Final Zigbee**

El dispositivo final (ZED, Zigbee End Device) es un dispositivo de funcionalidad reducida, con las siguientes funciones:

- Dormirse para almacenar energía.
- Requiere de pocos recursos de memoria, porque no almacena la información de la red y no ejecuta servicios de red.

1.3 FACTORES AMBIENTALES DENTRO DEL INVERNADERO

El desarrollo de cultivos en invernaderos, en sus diferentes fases de crecimiento, está condicionado por cuatro factores ambientales: temperatura, humedad relativa y luz⁵.

1.3.1 Temperatura

La temperatura es una magnitud física que expresa el grado de calor de los cuerpos o sustancias. La temperatura es la medida de la energía térmica de una sustancia. Se mide con un termómetro. Las escalas más empleadas para medir esta magnitud son la Escala Celsius (o centígrada) y la Escala Kelvin. 1°C es lo mismo que 1 K, la única diferencia es que el 0 en la escala Kelvin está a - 273 °C⁶.

La temperatura es el parámetro más importante a tener en cuenta en el manejo o control del ambiente dentro de un invernadero. Afecta directamente las funciones vitales como fotosíntesis, respiración, permeabilidad de la membrana celular, absorción de agua y nutrientes, transpiración, actividades enzimáticas, etc, procesos metabólicos que intervienen en el crecimiento y desarrollo de las plantas⁷.

Las reacciones biológicas de importancia no pueden desarrollarse si la temperatura del invernadero está por debajo de 0°C, o por encima de 50°C. El límite inferior corresponde al punto de congelación del agua y el superior a la desnaturalización de las proteínas. La temperatura óptima varía según las especies, pero casi siempre está comprendida entre 10° y 25°C. Las plantas pueden tolerar temperaturas más

⁵ INFOAGRO.COM, 2010, Control climático en invernaderos. 1ª parte. [online]. 2010. [Accessed 23 October 2013]. Available from: http://www.infoagro.com/industria_auxiliar/control_climatico.htm

⁶ QUIMICAWEB, 2008, EL CALOR Y LA TEMPERATURA. *El calor y la temperatura* [online]. 2008. [Accessed 23 October 2013]. Available from: http://www.quimicaweb.net/grupo_trabajo_ccnn_2/tema3/

⁷ FAO, 2002, CAPÍTULO 4: CONTROL DEL MEDIO AMBIENTE. [online]. 2002. [Accessed 23 October 2013]. Available from: <http://www.fao.org/docrep/005/s8630s/s8630s06.htm#bm06>

bajas durante períodos cortos de tiempo, pero debe evitarse el acercarse a este valor letal.

Sin embargo para el manejo de la temperatura es importante conocer las necesidades y limitaciones de la especie cultivada. La tabla 1 consigna las exigencias de temperatura de algunas plantas cultivadas en invernaderos.

Tabla 1. Exigencias de temperatura para distintas especies

	TOMATE	PIMIENTO	BERENJENA	PEPINO	MELÓN	SANDÍA
Tª mínima letal	0-2	(-1)	0	(-1)	0-1	0
Tª mínima biológica	10-12	10-12	10-12	10-12	13-15	11-13
Tª óptima	13-16	16-18	17-22	18-18	18-21	17-20
Tª máxima biológica	21-27	23-27	22-27	20-25	25-30	23-28
Tª máxima letal	33-38	33-35	43-53	31-35	33-37	33-37

Fuente: (Infoagro.com 2010)

Donde:

- Temperatura mínima letal. Aquella por debajo de la cual se producen daños en la planta.
- Temperaturas máximas y mínimas biológicas. Indican valores, por encima o por debajo respectivamente del cual, no es posible que la planta alcance una determinada fase vegetativa, como floración, fructificación, etc.
- Temperaturas nocturnas y diurnas. Indican los valores aconsejados para un correcto desarrollo de la planta.

1.3.2 Humedad Relativa

“La humedad es la masa de agua en unidad de volumen, o en unidad de masa de aire (kg/m^3). La humedad relativa (que se expresa en porcentaje), también conocida como humedad ambiental o del aire se define como la cantidad de agua que está presente en un volumen de aire, en relación con la cantidad máxima admitida por ese volumen a igual temperatura”⁸.

Esta humedad, que se encuentra dentro del invernadero se forma por la evaporación del agua del suelo y la transpiración de las plantas. La relación entre la temperatura y la humedad relativa es inversa, por lo tanto, a mayor temperatura, la capacidad de almacenar agua será menor. La humedad relativa dentro de un invernadero interviene en varios procesos, como el amortiguamiento de los cambios

⁸ INFOAGRO.COM, 2010, Control climático en invernaderos. 1ª parte. [online]. 2010. [Accessed 23 October 2013]. Available from: http://www.infoagro.com/industria_auxiliar/control_climatico.htm

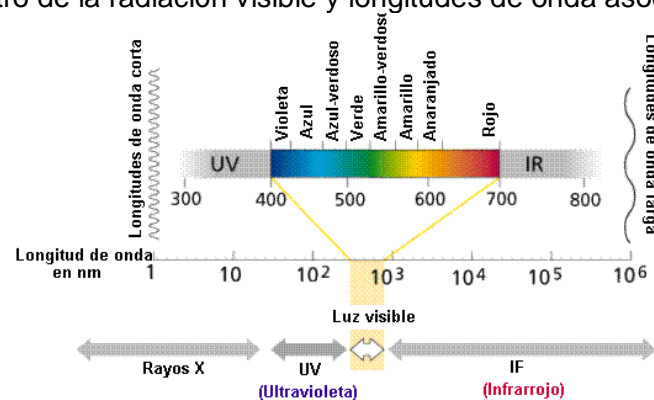
de temperatura, el crecimiento de las plantas, la viabilidad del polen para obtener mayor porcentaje de fecundación y el desarrollo de enfermedades. Cuando la HR es excesiva las plantas reducen la transpiración y disminuyen su crecimiento, se producen abortos florales por apelmazamiento del polen y un mayor desarrollo de enfermedades criptogámicas (causadas por hongos y bacterias perjudiciales para los cultivos). Por otro lado, cuando la HR es muy baja, las plantas transpiran en exceso, lo que puede acarrear, especialmente en fase de fructificación cuando la actividad radicular es menor, stress hídrico llegando a deshidratarse, y también cierre estomático con la consecuente reducción de fotosíntesis.

1.3.3 Luz Ambiente

La luz es una forma de energía llamada radiación electromagnética. Esta radiación, ya sea proveniente del sol o de lámparas HID varía en duración (energía a través del tiempo), calidad (longitud de onda o color), e intensidad (cantidad de luz por cada longitud de onda o color). Las unidades más comunes para medir la luz son pie-candela (Estados Unidos) y lux (Europa). Lux es la luminosidad (lumen) por metro cuadrado.

La parte de la luz que más influye que más influye en los procesos fisiológicos de las plantas es la radiación fotosintéticamente activa o PAR (photosynthetically active radiation), que hace referencia a la cantidad de radiación que es capaz de producir actividad fotosintética en las plantas y otros organismos fotosintéticos como micro algas y bacterias. El rango de longitudes de onda está comprendido aproximadamente entre los 400 y los 700 nm y corresponde también aproximadamente con el espectro visible por el ojo humano⁹ [35]. El espectro ó luz visible es en apariencia blanca, pero se compone, como demostró Newton, de diferentes colores, cada uno correspondiente a un rango de ese intervalo (ver figura 7).

Figura 7. Espectro de la radiación visible y longitudes de onda asociadas al mismo.



Fuente: (Universidad Politécnica de Valencia 2003)

⁹ TORRES, Adriana and LÓPEZ, Roberto, 2010, Medición de Luz Diaria Integrada en Invernaderos. [online]. 2010. [Accessed 24 October 2013]. Available from: <http://www.extension.purdue.edu/extmedia/HO/HO-238-SW.pdf>

La luz actúa sobre la asimilación de carbono, la temperatura de las hojas y en el balance hídrico, y en el crecimiento de órganos y tejidos, principalmente en el desarrollo de tallos, expansión de hojas y en la curvatura de tallos, interviene también, en la germinación de semillas y en la floración. La luz y la temperatura están directamente correlacionadas. En mayores niveles de luz hay mayor temperatura y a mayores niveles de temperatura hay mayor transpiración y consumo de agua. A mayor luminosidad en el interior del invernadero se debe aumentar la temperatura, la humedad relativa (HR) y el gas carbónico (CO₂), para que la fotosíntesis sea máxima; por el contrario, si hay poca luz pueden descender las necesidades de otros factores.

1.4 MARCO HISTÓRICO

Las redes de sensores inalámbricas o WSNs (Wireless Sensors Networks) han atraído mucha atención en años recientes. Es considerada como una de las tecnologías más importantes de siglo XXI¹⁰.

Las aplicaciones potenciales de las WSNs son inmensas. Cuentan con sensores distribuidos espacialmente para cumplir una tarea específica. Son usadas para reunir o recolectar, almacenar y compartir datos medidos o sensados. Las redes de sensores inalámbricas han sido utilizadas para varias aplicaciones, por ejemplo: monitoreo del hábitat, monitoreo de variables ambientales, agricultura, control y monitoreo industrial, productos electrónicos, automatización del hogar o domótica, asistencia médica (health care)¹¹.

1.4.1 Control y monitoreo industrial

Hongjiang y Shuangyou (2008)¹² describen como aplicar la tecnología Zigbee a la producción minera segura. El sistema es la unión de dispositivos Zigbee que transmiten inalámbricamente los datos de los sensores en la mina de carbón subterránea a un bus de comunicaciones CAN, el cual los transfiere al computador en un centro de monitoreo.

Estudios y experimentos recientes cómo el desarrollado por Minming, Bin, Jingjing, Li, Ziyuan, y Haibo (2011)¹³, brindan un método efectivo para monitorear gases dentro de una mina de carbón por medio de una ZWSN (ZigBee Wireless Sensor Network).

¹⁰ BUSINESS WEEK MAGAZINE, 1999, 21 Ideas For The 21st Century. *21 Ideas For The 21st Century* [online]. 1999. [Accessed 24 October 2013]. Available from: http://www.businessweek.com/1999/99_35/2121_content.htm

¹¹ KESHTGARI, Manijeh; DELJOO, Amene. A wireless sensor network solution for precision agriculture based on zigbee technology. *Wireless Sensor Network*, 2012, vol. 4, no 1, p. 25-30.

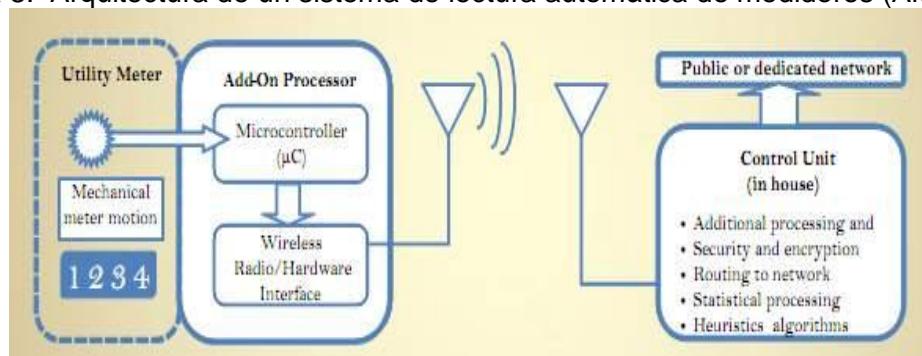
¹² HONGJIANG, He; SHUANGYOU, Wang. The application of ARM and ZigBee technology wireless networks in monitoring mine safety system. En *Computing, Communication, Control, and Management, 2008. CCCM'08. ISECS International Colloquium on*. IEEE, 2008. p. 430-433.

¹³ MINMING, Tong, et al. Study on ZigBee wireless sensor network in analyzing gas distribution of coal mining field. En *Electronic Measurement & Instruments (ICEMI), 2011 10th International Conference on*. IEEE, 2011. p. 121-124.

Se estableció la aplicabilidad de la tecnología Zigbee a medidas de rotor de un motor eléctrico¹⁴. Los requerimientos para transmisión de datos, estructura eléctrica y alimentación de un sensor también fueron examinados, y un prototipo inalámbrico basado en Zigbee y en un sensor de par o torque fue construido y probado, brindando resultados satisfactorios.

Los sistemas de lectura automática de medidores (referido en inglés como AMR, Automatic Meter Reading)¹⁵ basados en tecnología Zigbee ofrecen la posibilidad de monitorear o controlar el consumo residencial de agua potable, gas, electricidad, y reducir el número de vistas técnicas mensuales a cada residencia¹⁶. La figura 8 muestra la arquitectura de un sistema de lectura automática de medidores (AMR).

Figura 8. Arquitectura de un sistema de lectura automática de medidores (AMR)



Fuente:(Longtin 2008)

1.4.2 Monitoreo del hábitat

El monitoreo del hábitat incluye recolección de datos a cerca de las condiciones geográficas en que se desarrolla la vida de una especie animal o vegetal. En general, se trata de un conjunto de nodos (con dispositivos finales) ubicados espacialmente con el fin de crear una topología de red que permita transmitir y en el caso de Stojkoska y Davcev (2009)¹⁷ reportar en tiempo real datos medioambientales por largos periodos de tiempo a través de una interfaz web.

Las redes de sensores inalámbricas representan un avance significativo respecto a métodos tradicionales invasivos de monitoreo de especies animales y botánicas, disminuyendo errores y costos en las mediciones. Un ejemplo de esto es él, monitoreo del comportamiento reproductivo de aves en la isla Great Duck, Maine,

¹⁴ SÄRKIMÄKI, V., TIAINEN, R., LINDH, T. and AHOLA, J., 2006, Applicability of ZigBee technology to electric motor rotor measurements. In : *Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006. SPEEDAM 2006. International Symposium on.* 2006. p. 137–141.

¹⁵ FARAHANI, Shahin, 2011, *ZigBee Wireless Networks and Transceivers*. Newnes. ISBN 9780080558479.

¹⁶ CORRAL, Pablo, CORONADO, Beatriz, DE CASTRO LIMA, Antonio Cezar and LUDWIG, Oswaldo, 2012, Design of automatic meter reading based on Zigbee. *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)*. 2012. Vol. 10, no. 1, p. 1150–1155.

¹⁷ STOJKOSKA, Biljana; DAVCEV, Danco. Web Interface for Habitat Monitoring Using Wireless Sensor Network. En *Wireless and Mobile Communications, 2009. ICWMC'09. Fifth International Conference on.* IEEE, 2009. p. 157-162.

USA descrito por Mainwaring, Polastre, Szewczyk, Culler, y Anderson¹⁸. En dicho monitoreo se usan nodos (equipados con sensores infrarrojos que detectan la presencia de las aves) instalados en el interior de las madrigueras y en su superficie, para tomar medidas de humedad, presión, temperatura, y nivel de luz, que permiten a los biólogos analizar cambios en las condiciones ambientales dentro y fuera de las madrigueras durante la época de cría, variaciones entre los sitios de reproducción y parámetros de los sitios preferidos para la crianza. La figura 9 muestra la instalación de los nodos sensores.

Figura 9. Instalación de los nodos sensores en la isla Great Duck



Fuente: (Mainwaring, Culler, Polastre, Szewczyk, Anderson 2002)

La evaluación del hábitat y monitoreo de las especies son necesarias para evaluar la salud global del ecosistema. En el caso de un ecosistema como un bosque se han implementado aplicaciones basadas en WSN como las desarrolladas por Wenbin, Junguo, Junmei, Zhifeng y Guozhu (2009)¹⁹ y Kovács, Marosy y Horváth (2010)²⁰, que evalúan el riesgo de incendios forestales a través de sensores de temperatura, concentración de humo, presión atmosférica, humedad relativa y velocidad del viento.

¹⁸ MAINWARING, Alan, et al. Wireless sensor networks for habitat monitoring. En *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications*. ACM, 2002. p. 88-97.

¹⁹ LI, Wenbin, et al. The monitoring of host computer for forest fire detection system based on wireless sensor network. En *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2009. WiCom'09. 5th International Conference on*. IEEE, 2009. p. 1-4.

²⁰ KOVÁCS, Zoltán Gy; MAROSY, Gábor E.; HORVÁTH, Gyula. Case study of a simple, low power WSN implementation for forest monitoring. En *Electronics Conference (BEC), 2010 12th Biennial Baltic*. IEEE, 2010. p. 161-164.

1.4.3 Monitoreo de variables ambientales

El uso de WSNs para el monitoreo de variables relacionadas con el medio ambiente ha ido en aumento. Eren, Al-Ghamdi, y Luo (2009)²¹ desarrollaron un sistema de monitoreo de polución causada por la emisión de gases de los tubos de escape de automóviles. Los datos generados por los sensores de gas son transmitidos a estaciones remotas de monitoreo a través de Zigbee. Los resultados de las pruebas demostraron que el uso de gas natural en automóviles genera menos emisión de gases que incrementan el calentamiento global como el CO₂.

Similares sistemas de detección basados en Zigbee han sido empleados para monitorear la calidad del agua en ríos y lagos, cómo lo describen Wang, Ma, y Yang (2011)²² y Azwan Nasirudin, Nurulhaiza Za'bah, y Sidek²³.

1.4.4 Agricultura

En agricultura, las redes de sensores inalámbricas son usadas para aumentar la eficiencia y crecimiento en la producción del cultivo. Gran parte de las investigaciones están relacionadas con la agricultura de precisión. La agricultura de precisión se refiere a detectar, recolectar y enviar datos a una estación de control (PC, PDA, etc) para la toma de decisiones y actuar de acuerdo con la decisión, teniendo reduciendo el impacto ambiental²⁴.

Por lo general, los datos sensados son condiciones medioambientales como el tiempo (clima), temperatura, velocidad del viento, dirección del viento, humedad del suelo, propiedades físicas y químicas del suelo como PH, identificación de cultivos, el contenido de humedad de la hoja, índice de área foliar, etc²⁵.

Producto del monitoreo de estas variables, se destacan las siguientes actividades agrícolas: riego, control de plagas, horticultura y recolección de cosecha²⁶.

²¹ EREN, Halit; AL-GHAMDI, Ahmed; LUO, Jinhua. Application of ZigBee for pollution monitoring caused by automobile exhaust Gases. En *Sensors Applications Symposium, 2009. SAS 2009. IEEE*. IEEE, 2009. p. 164-168.

²² WANG, Xin, MA, Longquan and YANG, Huizhong, 2011, Online Water Monitoring System Based on ZigBee and GPRS. *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 15, no. 0, p. 2680 – 2684. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2011.08.504>.

²³ NASIRUDIN, Muhammad Azwan; ZA'BAH, Ummi Nurulhaiza; SIDEK, O. Fresh water real-time monitoring system based on Wireless Sensor Network and GSM. En *Open Systems (ICOS), 2011 IEEE Conference on*. IEEE, 2011. p. 354-357.

²⁴ RUIZ-GARCIA, Luis, LUNADEI, Loredana, BARREIRO, Pilar and ROBLA, Ignacio, 2009, A Review of Wireless Sensor Technologies and Applications in Agriculture and Food Industry: State of the Art and Current Trends. *Sensors*. 2009. Vol. 9, no. 6, p. 4728–4750. DOI 10.3390/s90604728.

²⁵ KALAIVANI, T.; ALLIRANI, A.; PRIYA, P. A survey on Zigbee based wireless sensor networks in agriculture. En *Trendz in Information Sciences and Computing (TISC), 2011 3rd International Conference on*. IEEE, 2011. p. 85-89.

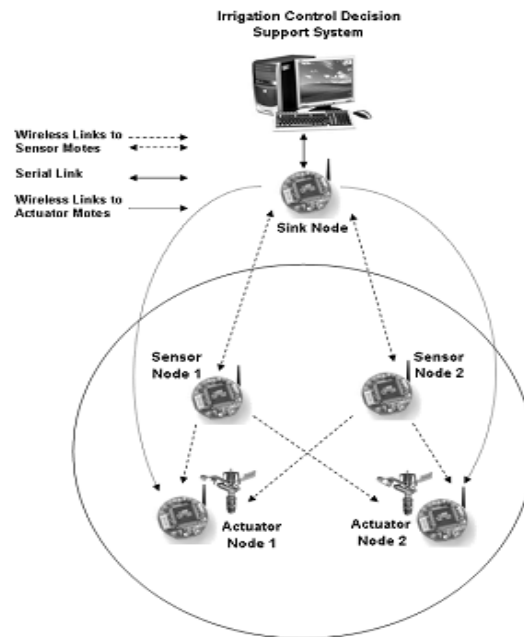
²⁶ ABBASI, Abu Zafar, et al. A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture. *Computer Standards & Interfaces*, 2011.

▪ Riego

El proceso de riego es definido como la aplicación artificial de agua en tierra agrícola y se considera como uno de los componentes más importantes de la agricultura. Aqeel-ur-Rehman, Shaikh, Yousuf, Nawaz, Kirmani y Kiran (2010)²⁷ desarrollaron un sistema de control de riego de cultivos en Pakistán. El sistema hace uso de una red inalámbrica de sensores y actuadores (Wireless Sensor and Actuator Network, WSAN) para monitorear parámetros ambientales como: temperatura, luz ambiente, humedad del aire y humedad del suelo y enviar los datos son adquiridos y enviados a través de módulos Zigbee a un computador, que luego de analizarlos, envía las señales de control para activar los actuadores, que ese caso son los aspersores. La figura 10 describe la arquitectura del sistema.

Zhou, Yang, Wang,y Ying (2009)²⁸, propone el diseño e implementación de un sistema de irrigación de bajo costo basado en tecnología Zigbee. El sistema está conformado por un único nodo sensor que mide la temperatura y la humedad del aire y varios nodos actuadores que activan las bombas de agua con comandos de control enviados por un PDA que actúa como un coordinador Zigbee. La figura 11 ilustra el esquema del sistema.

Figura 10. Arquitectura de red del sistema de control de riego

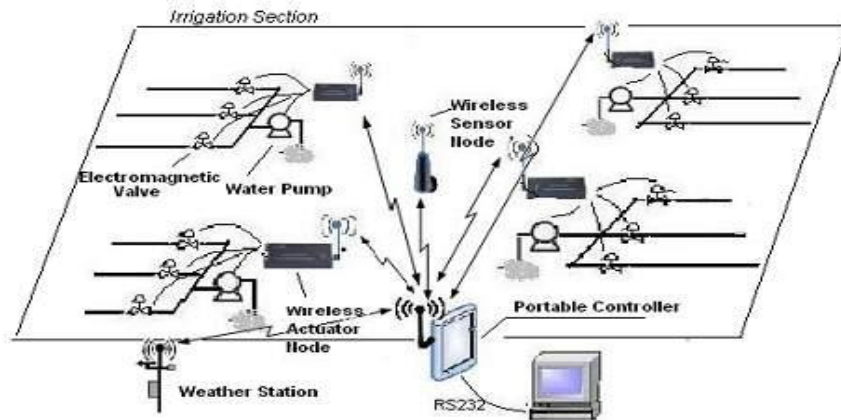


Fuente: (Zhou, Yang, Wang, Ying 2009)

²⁷ SHAIKH, Z. A., et al. Crop irrigation control using wireless sensor and actuator network (wsan). En *Information and Emerging Technologies (ICIET), 2010 International Conference on*. IEEE, 2010. p. 1-5.

²⁸ ZHOU, Yiming, et al. A wireless design of low-cost irrigation system using ZigBee technology. En *Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing, 2009. NSWCTC'09. International Conference on*. IEEE, 2009. p. 572-575.

Figura 11. Esquema propuesto de un sistema de riego controlado con tecnología Zigbee



Fuente: (Zhou, Yang, Wang, Ying 2009)

▪ **Control de plagas**

El manejo adecuado de plagas agrícolas es de vital importancia, de ello depende que los cultivos no sufran enfermedades que deterioran las plantas y producen decrementos de la cosecha. Jiménez, Ravelo y Gómez (2009)²⁹ desarrollaron un sistema de adquisición de datos capaz de seguir el comportamiento en espacio y tiempo de las enfermedades del durazno: torque, monilla, cenizo, perdigona y la plaga agrícola de la mosca de la fruta en una finca llamada Santa Isabel. Localizada en Duitama - Boyacá – Colombia.

El sistema hace uso de una red inalámbrica de sensores basada en tecnología Zigbee ZWSN para monitorear las variables climáticas de temperatura, dirección y velocidad del tiempo, humedad relativa y pluviosidad. Los datos e imágenes del conteo de hojas y frutos (duraznos) se envían a un dispositivo móvil PDA (Personal Digital Assistant) que los procesa y visualiza para hacer un seguimiento detallado de la evolución de las enfermedades y el impacto causado por la mosca de la fruta.

▪ **Viticultura**

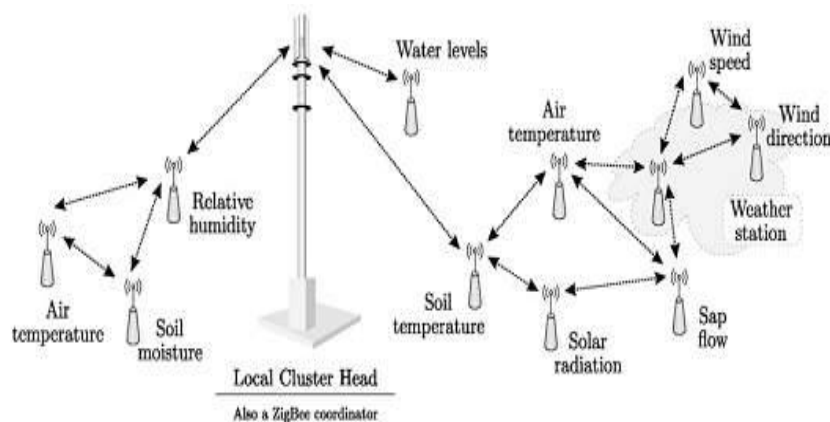
Las redes de sensores inalámbricas se usan en viticultura para monitorear distintas variables que influyen en el crecimiento de la uva.

²⁹ JIMÉNEZ, Andrés; RAVELO, Dianeth; GÓMEZ, Johana. Sistema de adquisición, almacenamiento y análisis de información fenológica para el manejo de plagas y enfermedades de un duraznero mediante tecnologías de agricultura de precisión. *Tecnura*, 2010, vol. 14, no 27, p. 41-51.

Morais, Fernandes, Matos, Serôdio, Ferreira y Reis (2008)³⁰ desarrollaron una red inalámbrica de sensores basada en tecnología Zigbee ZWSN usando dispositivos MPWiNodeZ, destinados a aplicaciones de viticultura de precisión. Los dispositivos cuentan con la ventaja de recargar las baterías a partir de la generación de energías limpias como solar y eólica.

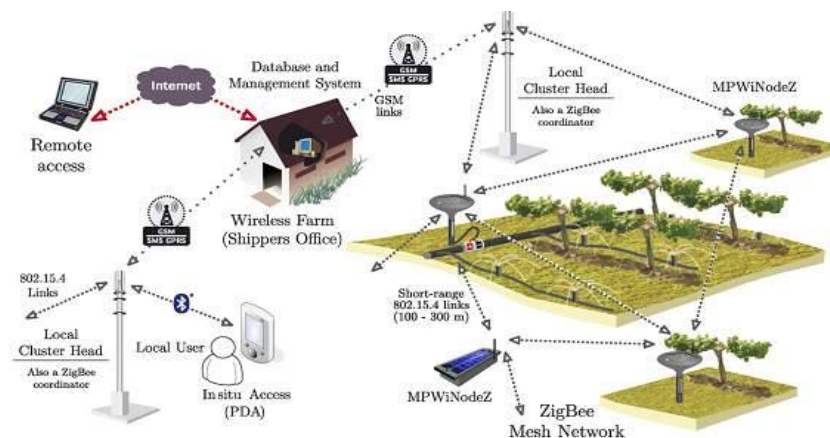
La red usa la topología de malla para monitorear el contenido de humedad del suelo, temperatura del aire, humedad relativa, y radiación solar. La figura 12 muestra la aplicación de una red Zigbee con topología de malla en el monitoreo de las variables. La arquitectura de red implementada se muestra en la figura 13.

Figura 12. Red de sensores inalámbrica con topología de malla usada en el monitoreo de variables ambientales presentes en un viñedo.



Fuente: (Morais, Fernandes, Matos, Serôdio, Ferreira, Reis 2008)

Figura 13. Implementación de la red de adquisición de datos usando los dispositivos MPWiNodeZ en un entorno de viticultura de precisión.



Fuente: (Morais, Fernandes, Matos, Serôdio, Ferreira, Reis 2008)

³⁰ MORAIS, Raul, et al. A ZigBee multi-powered wireless acquisition device for remote sensing applications in precision viticulture. *Computers and electronics in agriculture*, 2008, vol. 62, no 2, p. 94-106.

1.4.5 Productos electrónicos

De Bona, Ferreira y Schwarz (2010)³¹, desarrollaron e implementaron un sistema de monitoreo remoto de tablas de surf para ser usado en la evaluación del desempeño de un surfista. El sistema usa módulos Zigbee para transmitir las variaciones de resistencia eléctrica generadas por galgas extensiométricas (strain gages), que convierten el movimiento mecánico (producido por la presión ejercida sobre la tabla) en resistencia eléctrica. Otro módulo Zigbee, configurado como coordinador, se encarga de recibir la información para ser procesada y visualizada. Los dos módulos Zigbee conforman una red con topología estrella, en la cual los dispositivos se comunican punto a punto. La figura 14 describe la implementación del sistema.

Figura 14. Comunicación punto a punto del sistema de monitoreo de una tabla de surf.



Fuente: (Dezan de Bona, de Salvador Ferreira, Schwarz 2010)

³¹ DEZAN DE BONA, D, DE SALVADOR FERREIRA, G and SCHWARZ, L, 2010, Sensoriamento remoto em pranchas de surfe utilizando tecnologia ZigBee. In: *Industry Applications (INDUSCON), 2010 9th IEEE/IAS International Conference on*. 2010. p. 1–6.

2. DESARROLLO DEL PROTOTIPO

2.1. SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS

2.1.1 Sensores

Un sensor es un dispositivo capaz de medir magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, y transformarlas en variables eléctricas. Las variables de instrumentación pueden ser por ejemplo: temperatura, intensidad lumínica, distancia, aceleración, inclinación, desplazamiento, presión, fuerza, torsión, humedad, pH, etc.

Debido a los requisitos de este proyecto de ahora en adelante se centrará en tres tipos de sensores: sensores de temperatura, sensores de humedad relativa y sensores de intensidad de luz.

Antes de discutir sobre la elección de los sensores a utilizar, es necesario definir algunas características importantes.

2.1.2 Características y especificaciones generales de los sensores

El comportamiento de un sistema de medida viene condicionado por el sensor utilizado, por ello es importante describir las características de los sensores³².

Cuando se habla de características de los sensores, se hace referencia a sus propiedades o comportamientos frente a las excitaciones o señales de entrada, es decir, una descripción basada en la relación entrada/salida o función de transferencia.

Cuando la señal de entrada es constante o tiene cambios despreciables con respecto al tiempo, o cambia muy lentamente, en el sensor se pueden describir sus *características estáticas*.

Si la señal de entrada varía en el tiempo (régimen transitorio), surgen sus *características dinámicas*.

La tabla 2 enumera las principales características estáticas y dinámicas que suelen aparecer en la mayoría de las especificaciones técnicas de los sensores.

³² PALLAS ARENY, Ramón. Sensores y acondicionadores de señal. *Marcombo, SA Barcelona*, 2001.

Tabla 2. Características estáticas y dinámicas de los sensores.

Características estáticas y dinámicas de los sensores	
Estáticas	Dinámicas
Rango	Error dinámico Velocidad de respuesta
Alcance	
Resolución	
Exactitud	
Precisión	
Repetibilidad	
Reproducibilidad	
Histéresis	
Zona muerta	
Linealidad	
Sensibilidad	
Deriva	

Fuente: (Uva.es 2010)

▪ **Características estáticas**

Rango o campo de medida (range): Es el conjunto de valores de la variable medida, que están comprendidos dentro de los límites superior (URV: Upper Range Value) e inferior (LRV: Lower Range Value) de la capacidad de medida o de transmisión de un instrumento; viene expresado estableciendo los dos valores extremos ³³.

Ejemplo:

0 – 150 °C

100 – 300 °C

-20 – 200 °C

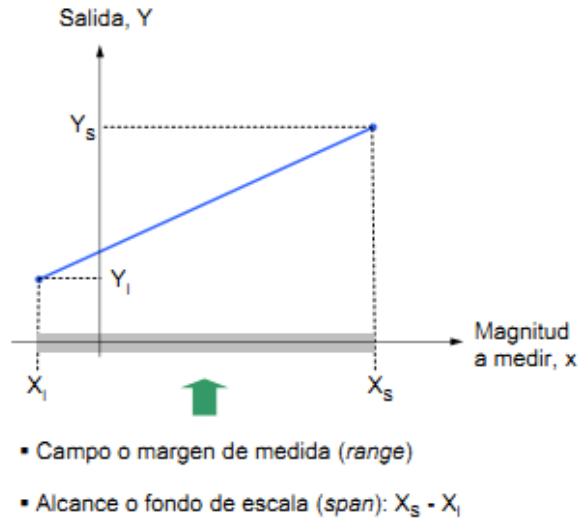
Alcance o fondo de escala (span, input full scale): Es la diferencia algebraica entre los valores superior e inferior del campo de medida del instrumento: $\text{span} = \text{URV} - \text{LRV}$

Ejemplo:

Rango: -20 - 200 °C; alcance= 220 °C

³³ ANTONIO, Creus Solé. INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL, 7 edición MARCOMBO. SA, México, México, 2005.

Figura 15. Rango y alcance.



Fuente: (Ferrero 2006)

Resolución o discriminación (resolution): Es el mínimo incremento de la entrada que ofrece un cambio medible en la salida. Se suele expresar como un valor en tanto por ciento sobre el fondo de escala. Cuando el incremento de la entrada se produce a partir de cero, se habla de umbral. En los sensores con formato de salida digital la resolución se expresa en bits³⁴.

Exactitud (Accuracy): Es la cualidad de un instrumento de medida por la que tiende a dar lecturas próximas al verdadero valor de la magnitud medida³⁵.

La exactitud indica el máximo error que puede existir en la medición, por lo que en realidad debería hablarse de inexactitud más que de exactitud³⁶.

Hay varias formas de expresar la exactitud:

a) En tanto por ciento del alcance.

Ejemplo:

Lectura= 150 °C; alcance = 200 ° C, con una exactitud= ±0,5%

Valor real = 150 °C ±0,5 *200/100

El valor real de la temperatura estará comprendido entre 150 °C ± 1°C, es decir entre 149°C y 151°C

³⁴ PALLAS ARENY, Ramón. Sensores y acondicionadores de señal. *Marcombo, SA Barcelona*, 2001

³⁵ ANTONIO, Creus Solé. INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL, 7 edición MARCOMBO. SA, *México, México*, 2005.

³⁶ Op. Cit, p. 12

- b) En términos de la variable medida:
Ejemplo: Exactitud de $\pm 1^\circ\text{C}$
- c) En tanto por ciento de la lectura realizada:
Ejemplo: exactitud = $\pm 1\%$ de 150°C , es decir $\pm 1,5^\circ\text{C}$
- d) En tanto por ciento del valor máximo del campo de medida.
Ejemplo: exactitud = $\pm 0,5\%$ alcance = 300°C
Exactitud = $\pm 1,5^\circ\text{C}$

e) En tanto por ciento de la longitud de la escala.

Ejemplo: exactitud = $\pm 0,5\%$, longitud de la escala = 150 mm

Representa $0,75\text{ mm}$ de longitud de escala.

Precisión o fidelidad: Es la cualidad que caracteriza la capacidad de un instrumento de medida de dar el mismo valor de la magnitud medida. Al medir varias veces en unas mismas condiciones determinadas (ambientales, operador, etc.), prescindiendo de su concordancia o discrepancia con el valor real de dicha magnitud³⁷ [38]. La figura 16 muestra la diferencia exactitud y precisión, suponiendo que la medida real es el centro de los círculos. Un sensor que sea preciso no necesariamente es exacto; puede tener fidelidad en sus medidas así estas estén lejos de la medida o valor real.

Figura 16. Diferencia entre exactitud y precisión.



Fuente: (Ferrero 2006)

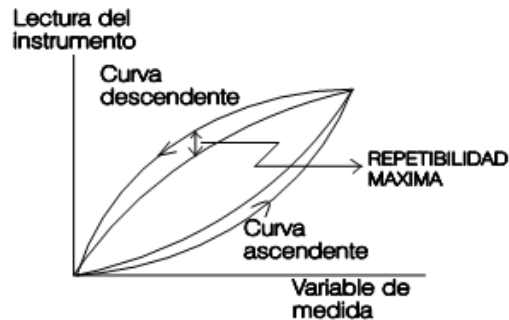
Repetibilidad (repeatability): Es la habilidad de un instrumento a reproducir una lectura de salida cuando el mismo estímulo le es aplicado consecutivamente (en un intervalo de tiempo corto) bajo las mismas condiciones y en la misma dirección³⁸. La repetibilidad es expresada como la máxima diferencia entre las lecturas de salida;

³⁷ PALLAS ARENY, Ramón. Sensores y acondicionadores de señal. *Marcombo, SA Barcelona*, 2001

³⁸ FERRERO, Fernando José, 2006, Lección 6. Fundamentos de los sistemas de medida. [online]. 2006. Available from: <http://www.ate.uniovi.es/5809/Lección06.pdf>

como se muestra en la figura 17 y que no incluye la histéresis. Se expresa en tanto por ciento del alcance, un valor característico es el de $\pm 0,1\%$.

Figura 17. Repetibilidad

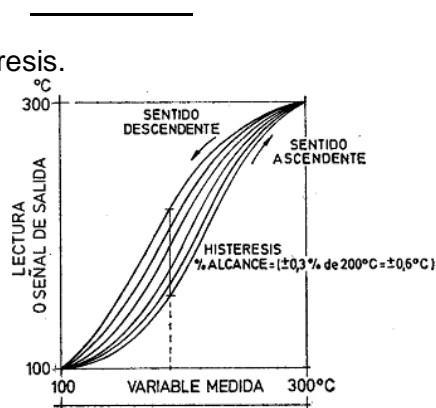


Fuente: (Calderón-Vielma 2006)

Reproducibilidad (reproducibility): La máxima diferencia entre un cierto número de salidas (medidas) para la misma entrada, tomadas en un período extenso de tiempo, realizada en diferentes condiciones (personas, laboratorios, etc.) aproximándose por ambas direcciones. La reproducibilidad, incluye histéresis, banda o zona muerta y repetibilidad. Un valor representativo es $\pm 0,2\%$ del alcance de la lectura o señal de salida a lo largo de un período de 30 días³⁹.

Histéresis (hysteresis): Es la diferencia máxima que se observa en los valores indicados por el instrumento para el mismo valor dentro del rango de medida, cuando la variable recorre toda la escala en los dos sentidos, ascendente y descendente, como se observa en la figura 195. Se expresa en tanto por ciento del alcance de la medida. Por ejemplo: si en un termómetro de 0-100 %, para el valor de la variable de 40 °C, la aguja marca 39,9 al subir la temperatura desde 0, e indica 40,1 al bajar la temperatura desde 100 °C, el valor de la histéresis es de:

Figura 18. Curva de histéresis.

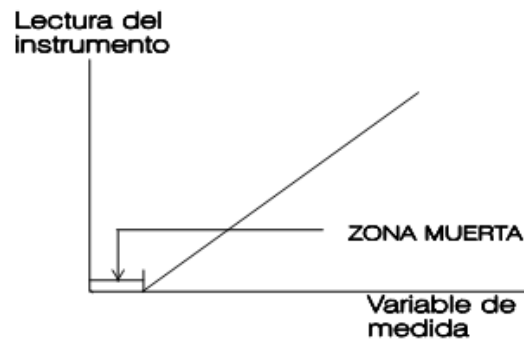


Fuente: (Creus Solé 2005)

³⁹ CALDERÓN-VIELMA, Jesús A, 2006, Fundamentos De Las Mediciones Eléctricas Teoría Y Prácticas De Laboratorio. [online]. 2006. [Accessed 24 October 2013]. Available from: <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/damarquezg/LIBFUND1.pdf>

Zona muerta (dead zone or dead band): Es el campo de valores de la variable que no hace variar la indicación o la señal de salida del instrumento, es decir, que no produce su respuesta, como lo muestra la figura 19. La zona muerta está incluida dentro de la histéresis. Viene dada en tanto por ciento del alcance de la medida.

Figura 19. Zona muerta.



Fuente: Calderón-Vielma 2006)

Linealidad: Es la proximidad de la curva de calibración del sensor a una línea recta especificada⁴⁰. Es usualmente medida como una no linealidad y expresada como linealidad; por ejemplo, una máxima desviación entre una curva promedio y una línea recta especificada. La curva promedio es determinada después de hacer dos o más recorridos del rango total de entrada en cada dirección (ascendente y descendente). El valor de la linealidad es referido a la salida a menos que se indique lo contrario. La máxima desviación puede ser expresa en tanto por ciento del alcance o cualquier valor del rango (ver figura 21).

Según cuál línea recta se utilice para aproximar la curva de calibración se habla de:

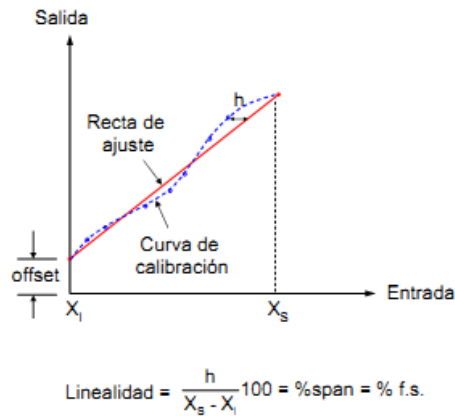
- **Linealidad independiente (Independent linearity):** La línea de referencia se define por el método de los mínimos cuadrados. De esta forma el máximo error positivo y el mínimo error negativo son iguales. Es la forma de especificación que suele dar mejores resultados.
- **Linealidad ajustada al cero (Zero-based linearity):** la recta se define también por el método de los mínimos cuadrados, pero con la restricción adicional de pasar por el origen.
- **Linealidad terminal (Terminal-based Linearity):** la recta se define por la salida sin entrada y la salida teórica máxima, correspondiente a la mayor entrada admisible.

⁴⁰ ANTONIO, Creus Solé. INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL, 7 edición MARCOMBO. SA, México, México, 2005.

Linealidad a través de los extremos: la recta se define mediante la salida real cuando la entrada es la menor del alcance especificado, y la salida real cuando la entrada es la máxima del alcance especificado.

Linealidad teórica: la recta es definida por las previsiones teóricas formuladas al diseñar el sensor.

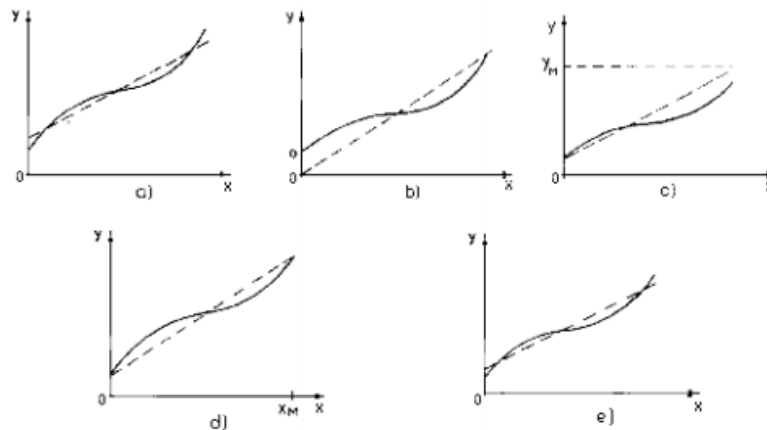
Figura 20. Linealidad.



Fuente: (Ferrero 2006)

En la figura 21 se representan estas distintas rectas para un sensor con una curva de calibración dada. La linealidad expresa hasta qué punto es constante la sensibilidad del sensor, pero para que un sensor sea válido no es condición indispensable que sea lineal. El interés de la linealidad está en que la conversión lectura-valor medido es más fácil si la sensibilidad es constante para conocer el valor de la entrada. Además en instrumentos lineales la no linealidad equivale a inexactitud (REF). Los principales factores que influyen en la no linealidad son: la resolución, el umbral y la histéresis.

Figura 21. Tipos de linealidad. a) Independiente; b) Ajustada a cero; c) Terminal; d) A través de los extremos; e) Teórica.



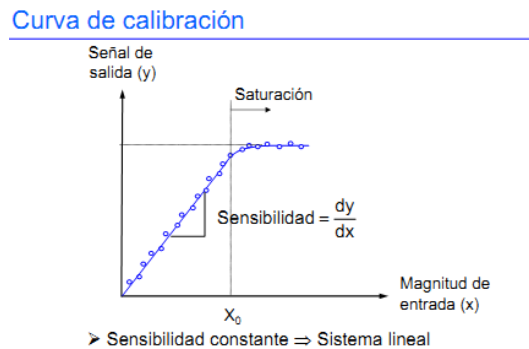
Fuente: (Areny 2003)

Sensibilidad (sensitivity): es la razón entre el incremento de la lectura y el incremento de la magnitud que lo ocasiona, después de haber alcanzado el estado de reposo. En general, es la pendiente de la curva de calibración, que puede ser o no constante a lo largo de la escala de medida [39]. Par un sensor cuya salida esté relacionada con la entrada x mediante la ecuación $y=f(x)$, la sensibilidad en el punto x_0 , es:

$$S = \frac{dy}{dx}$$

La curva de calibración (ver figura 22) de un sensor o de un sistema de medida en general es la línea que une los puntos obtenidos aplicando sucesivos valores de la magnitud de entrada e ir anotando los respectivos valores de salida. Los valores de entrada se determinan con un sistema de medida de calidad superior al que se está calibrando.

Figura 22. Curva de calibración.



Fuente: (Ferrero 2006)

Deriva (drift): es el cambio no deseado en la señal de salida en un periodo de tiempo, el cual, no es función del medio de medición. La deriva se describe sobre un punto (point drift) que es el cambio en la salida sobre un especificado periodo de tiempo para una entrada constante, bajo condiciones especificadas de operación.

Así, se puede considerar la deriva de cero (variación en la señal de salida para el valor cero de la medida a cualquier causa interna), y la deriva térmica de cero (variación en la señal de salida a medida cero, debida a los efectos únicos de temperatura⁴¹). Se expresa en tanto por ciento del alcance. Ejemplo: 0,2% de 100 °C = $\pm 0,2$ °C (campo 50-150°C)

▪ **Características dinámicas**

Establecen la relación entre la entrada y la salida de un sensor cuando el tiempo transcurrido desde la última variación de la entrada es inferior al necesario para que

⁴¹ CALDERÓN-VIELMA, Jesús A, 2006, Fundamentos De Las Mediciones Eléctricas Teoría Y Prácticas De Laboratorio. [online]. 2006. [Accessed 24 October 2013]. Available from: <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/damarquezg/LIBFUND1.pdf>

la salida alcance el régimen permanente. Difieren de las estáticas debido a la existencia de elementos que almacenan energía (masas en dispositivos mecánicos, inductancias o condensadores en dispositivos eléctricos).

El tipo de entrada puede ser transitoria (impulso, escalón, rampa), periódica (senoidal) o aleatoria (ruido blanco). La elección de una u otra depende del tipo de sensor.

Estas características están representadas por el error dinámico y por la velocidad de respuesta.

Error dinámico (Dynamic error): Diferencia entre el valor obtenido y el valor exacto de la variable medida, cuando el error estático es nulo. Describe la diferencia entre las respuestas del sensor a una magnitud de entrada constante y otra variable en el tiempo⁴².

Velocidad de respuesta: Capacidad para que la señal de salida siga sin retraso las variaciones de la señal de entrada. Se cuantifica mediante las constantes de tiempo T_d , T_r , T_s , τ , etc.

Para describir matemáticamente el comportamiento dinámico se supone que el sistema puede ser adecuadamente caracterizado por una ecuación diferencial lineal de coeficientes constantes y que, por lo tanto, se tiene un sistema invariable en el tiempo. En estas condiciones, la relación entre la salida y la entrada puede expresarse de manera simple, en forma de cociente, empleando la transformada de Laplace de ambas señales y la función de transferencia propia del sensor.

De acuerdo con su comportamiento dinámico los sensores se pueden clasificar en:

Sistemas de orden cero

Sistemas de primer orden

Sistemas de segundo orden

Normalmente no es necesario emplear modelos superiores al de orden dos.

Sistemas de orden cero: Un sensor de orden cero es aquel cuya salida está relacionada con la entrada mediante una ecuación del tipo:

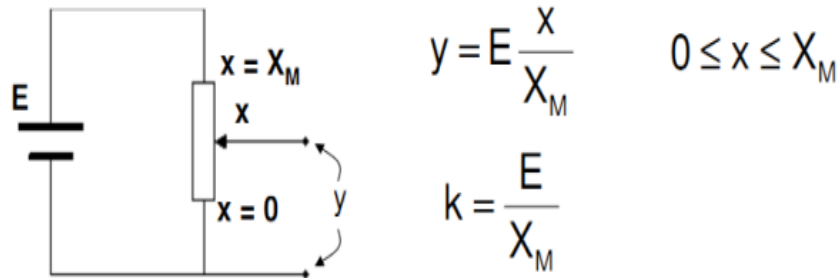
Su comportamiento está caracterizado por la sensibilidad (k) y tanto su error dinámico como su retardo son nulos⁴³.

⁴² ARENY, Ramón Pallás, 2003, *Sensores y acondicionadores de señal*. Cuarta edición. Marcombo. ISBN 8426713440.

⁴³ Ibid. P. 25

Un sistema de orden cero no posee ningún elemento almacenador de energía, por ejemplo los potenciómetros empleados para la medida de desplazamientos lineales y angulares, como se muestra en la figura 23.

Figura 23. Potenciómetro lineal como sensor de posición.



Fuente: (Uva.es 2010)

Sistemas de primer orden: Los sensores de primer orden están formados por un elemento que almacena energía y otro que la disipa.

La relación entre la entrada $x(t)$ y la salida $y(t)$ viene dada por una ecuación diferencial del tipo:

$$a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 \cdot y(t) = x(t)$$

La función de transferencia que relaciona la salida con la entrada se muestra en la figura:

Figura 24. Función de transferencia que relaciona la salida con la entrada

$a_1 s Y(s) + a_0 Y(s) = X(s)$ $Y(s)(a_1 s + a_0) = X(s)$ $\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{(a_1 s + a_0)}$ $\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1/a_0}{(a_1/a_0 s + 1)}$	<p>La sensibilidad estática y la constante de tiempo están dadas por:</p> $k = \frac{1}{a_0} \quad y \quad \tau = \frac{a_1}{a_0}$ <p>Finalmente:</p> $\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{k}{\tau s + 1}$
---	--

Fuente: (virtual unal 2008)

Las constantes k y τ determinan las características estáticas y dinámicas del sistema respectivamente.

La frecuencia propia del sensor está dada por:

$$\omega_c = \frac{1}{\tau}$$

El error dinámico está definido por:

$$\varepsilon_d = y(t) - x(t)$$

Y dependen de la forma de la señal de entrada, $x(t)$.

La expresión de la señal de salida para cada una de las entradas más frecuentes (escalón, rampa y senoidal) se muestran en tabla 3.

Tabla 3. Salida de un sistema de primer orden frente a distintas entradas múltiples.

Entrada	Salida
Escalón, $u(t)$	$k(1 - e^{-t/\tau})$
Rampa, Rt	$Rkt - Rk\tau u(t) + Rk\tau e^{-t/\tau}$
Senoide, A, ω	$\frac{kA\tau\omega e^{-t/\tau}}{1 + \tau^2\omega^2} + \frac{kA}{(1 + \tau^2\omega^2)^{1/2}} \text{sen}(\omega t + \theta)$ $\theta = \arctan(-\omega\tau)$

Fuente: (Areny 2003)

La respuesta de un sistema de primer orden ante una entrada en escalón se suele caracterizar mediante cuatro parámetros:

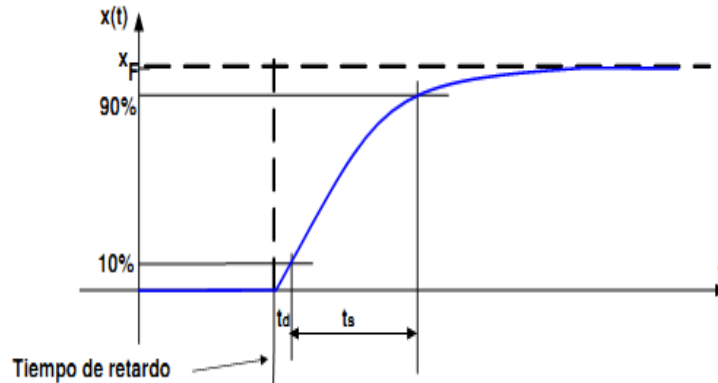
- Tiempo de subida
- Tiempo de establecimiento
- Tiempo de respuesta
- Constante de tiempo

Tiempo de retardo (Delay time, t_d): Tiempo que transcurre desde que se aplica la señal en escalón a la entrada y la salida alcanza el 10% del valor final.

Tiempo de subida (Rise time, t_r): Tiempo que transcurre entre el instante en que la señal de salida alcanza el 10% de su valor final y el instante en que alcanza el

90% como resultado de un cambio en escalón de la magnitud de entrada. Se denomina t_s ⁴⁴.

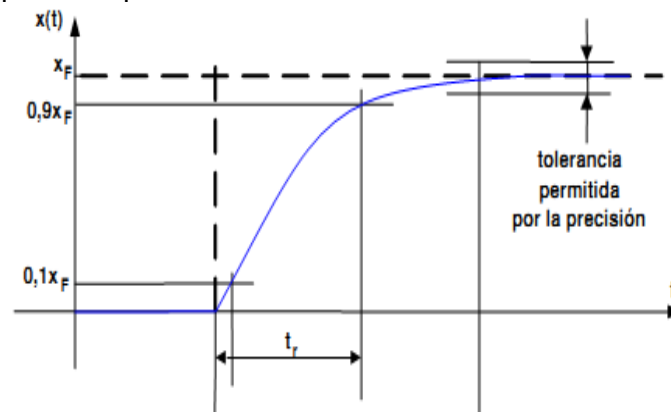
Figura 25. Tiempo de retardo y tiempo de subida y tiempo de subida.



Fuente: (*Sensores y acondicionadores* 2010)

Tiempo de respuesta (Response time): Tiempo transcurrido desde que se aplica un cambio en escalón de la magnitud a medir hasta que la salida alcanza un porcentaje determinado de su valor final. Cuando el porcentaje es el 90%, coincide con el tiempo de retardo más el de subida [43]. $t_r = t_d + t_s$

Figura 26. Tiempo de respuesta



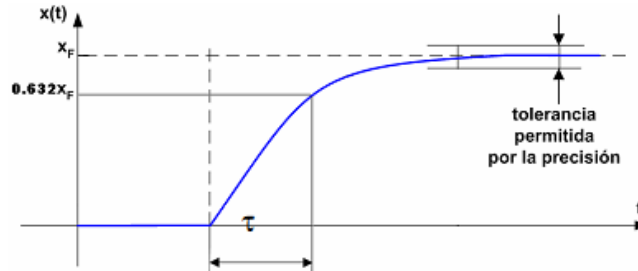
Fuente: (*Sensores y acondicionadores* 2010)

Constante de tiempo T (Time constant): Tiempo transcurrido desde que se aplica un cambio en escalón de la magnitud a medir hasta que la salida alcanza el 63,2% de su valor final. Representa un caso particular del tiempo de respuesta⁴⁵.

⁴⁴ Sensores y acondicionadores, 2010. *Tema 3. Características de funcionamiento y operativas* [online], [Accessed 24 October 2013]. Available from: <http://www.marcombo.com/Descargas/9788426715753/SENSORES/TEMAS/SA%20Tema%2003-%20Características%20de%20funcionamiento%20y%20operativas.pdf>

⁴⁵ Sensores y acondicionadores, 2010. *Tema 3. Características de funcionamiento y operativas* [online], [Accessed 24 October 2013]. Available from: <http://www.marcombo.com/Descargas/9788426715753/SENSORES/TEMAS/SA%20Tema%2003-%20Características%20de%20funcionamiento%20y%20operativas.pdf>

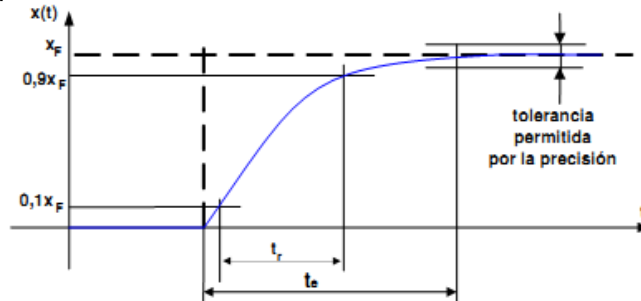
Figura 27. Constante de tiempo.



Fuente: (*Sensores y acondicionadores 2010*)

Tiempo de establecimiento (Settling time, t_s): Tiempo que transcurre desde que se aplica un cambio en escalón de la magnitud de entrada hasta que el sistema proporciona una salida dentro del margen de tolerancia definido por su precisión. A veces se considera que su valor es igual a cinco veces la constante de tiempo.

Figura 28. Tiempo de establecimiento.



Fuente: (*Sensores y acondicionadores 2010*)

Sistemas de segundo orden: Un sistema es de segundo orden cuando tiene dos elementos de almacenamiento de energía, y otros dos que la disipan [38].

La relación entre la entrada $x(t)$ y la salida $y(t)$ viene dada por la ecuación diferencial lineal de segundo orden de la forma:

$$a_2 \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \cdot \frac{dy}{dt} + a_0 \cdot y = x(t)$$

La función de transferencia es:

$$X(s) = (a_2 s^2 + a_1 s + a_0) Y(s)$$

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}$$

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1/a_0 \cdot a_0/a_2}{s^2 + a_1/a_2 s + a_0/a_2}$$

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{k\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

Dónde:

Donde:

$$k = \frac{1}{a_0}$$

$$\omega_n^2 = \frac{a_0}{a_2}$$

$$\zeta = \frac{a_1}{2(a_0 a_2)^{1/2}}$$

k Sensibilidad estática

ω_n Frecuencia natural del sensor [rad/seg]

ζ Coeficiente de amortiguamiento

Fuente: Fuente: (virtual unal 2008)

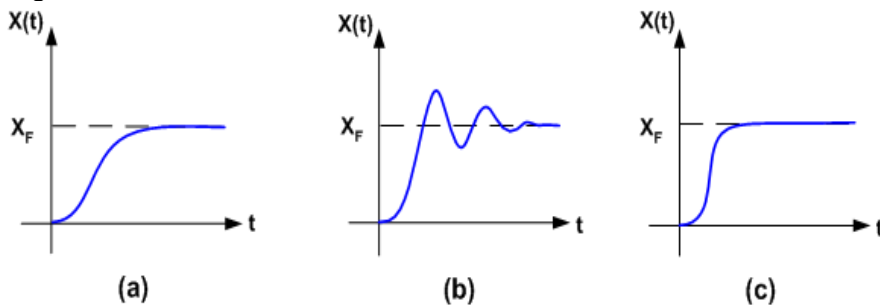
En un sistema de segundo orden, la respuesta ante una entrada en escalón presenta tres casos diferentes:

Sistema sobreamortiguado (Overdamped system): Sistema de respuesta lenta cuya salida alcanza el valor final sin superarlo en ningún momento.

Sistema subamortiguado (Underdamped system): Sistema de respuesta rápida cuya salida oscila alrededor del valor final hasta que lo alcanza.

Sistema con amortiguamiento crítico: Sistema sobreamortiguado que posee la respuesta más rápida posible.

Figura 29. (a). Sistema sobreamortiguado, (b) Sistema subamortiguado, (c) Sistema con amortiguamiento crítico.



Fuente: (*Sensores y acondicionadores* 2010)

Sistema de segundo orden subamortiguado

- **Sobreoscilación**

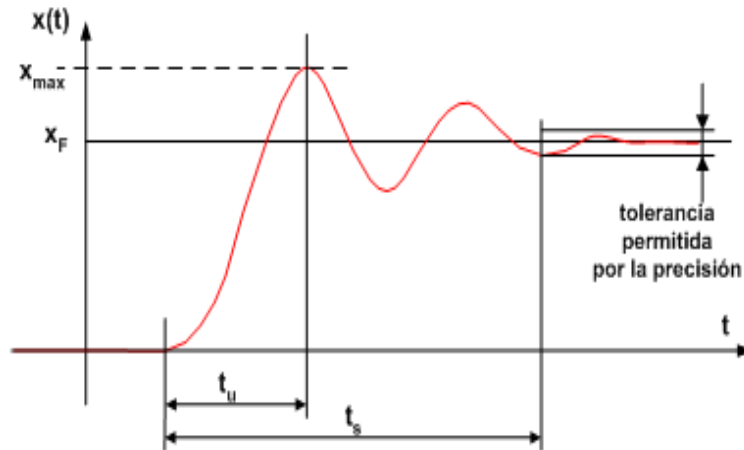
Cociente entre el valor máximo que se alcanza y el valor final en %:

—

- Tiempo de establecimiento (t_s)

Tiempo a partir del cual la señal queda siempre dentro de la banda del margen de confianza definida por la precisión del sistema.

Figura 30. Sistema de segundo orden subamortiguado.



Fuente: (Ferrero 2006)

▪ Acondicionamiento de señal

Acondicionamiento de señal se define como la adaptación de la señal proveniente del sensor en una señal apta para ser presentada, registrada o procesada⁴⁶. El acondicionamiento de la señal consiste en realizar una o varias de las siguientes funciones:

Amplificación: se realiza cuando se considera que el nivel de salida de un sensor es demasiado bajo (milivoltios). La amplificación por medios analógicos se realiza con la ayuda del amplificador operacional, el cual requiere una impedancia de entrada elevada para minimizar los efectos de carga en la señal de salida. Cuanto antes se pueda elevar los niveles de las señales, tanto mejor porque los posibles ruidos que se introduzcan en el circuito resultarán cuantitativamente menores⁴⁷.

Filtrado: consiste en eliminar una cierta banda de frecuencias de la señal. El intervalo de frecuencias que deja pasar un filtro es la banda de paso, el intervalo que no se deja pasar es la banda de rechazo y los límites entre ambos intervalos son las frecuencias de corte.

⁴⁶ ARENY, Ramón Pallás, 2003, *Sensores y acondicionadores de señal*. Cuarta edición. Marcombo. ISBN 8426713440.

⁴⁷ NATIONAL INSTRUMENTS, Acondicionamiento de Señales Necesario para Medidas de Temperatura - National Instruments. [online]. 2010. [Accessed 24 October 2013]. Available from: <http://www.ni.com/white-paper/11892/es#toc1>

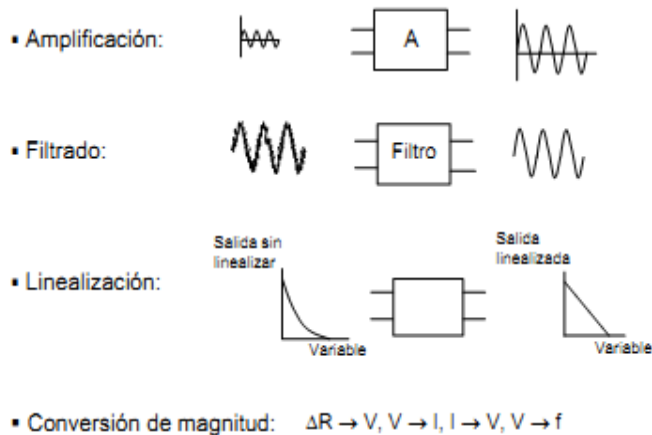
Linealización: consiste en obtener una señal de salida que varíe linealmente con la variable que se desea medir. Un caso bastante frecuente es el de un sensor donde la salida varía de forma exponencial con respecto a la variable a medir⁴⁸.

Conversión de señal: se requiere cuando es necesario convertir un tipo de variación eléctrica en otro. Así un gran número de sensores varían su resistencia como consecuencia de la variación de la variable a medir. En estos casos se requiere un circuito que convierta estos cambios de resistencia en una tensión o en una corriente.

Es bastante frecuente también en la transmisión de una señal (sobre todo a largas distancias) la necesidad de realizar una conversión de tensión a corriente o la conversión de tensión a frecuencia⁴⁹. La figura 31 describe gráficamente las funciones del acondicionamiento de señal.

Figura 31. Etapas del acondicionamiento de señal.

Acondicionamiento de la señal



Fuente: (Ferrero 2006)

2.1.3 Evaluación de sensores

Las tecnologías de sensores han tenido un impacto enorme en las industrias modernas. Hay miles disponibles en el mercado que están listos para ser unidos a una plataforma inalámbrica de medición o sensado. Esta sección en particular estará encaminada en mirar algunas tecnologías de sensores de humedad relativa, luz y temperatura que podrían ser utilizadas para este proyecto. También se va a describir sus principios de funcionamiento, tipo de acondicionamiento de señal, y algunas de sus características estáticas y dinámicas más importantes.

⁴⁸ FERRERO, Fernando José, 2006, Lección 6. Fundamentos de los sistemas de medida. [online]. 2006. Available from: <http://www.ate.uniovi.es/5809/Lección06.pdf>

⁴⁹ Ibid, p. 3.

- **Sensores de humedad relativa**

Existen dos tipos de tecnologías de medición de la humedad relativa: sensores de humedad capacitivos y sensores de humedad resistivos⁵⁰. Las tablas 4, 5 y 6 citan las principales características de cada tipo.

- **Sensores de luz ambiente**

Existe una variedad amplia de sensores de luz disponibles para varias aplicaciones. Por consiguiente, una selección cuidadosa de los sensores de luz es primordial. Las plantas absorben la luz del sol y la usan como combustible en el proceso de fotosíntesis. La luz del sol (en el intervalo de 400 a 700nm) es habitualmente utilizada por las plantas y a menudo se conoce como radiación fotosintéticamente activa o PAR. El monitoreo de la radiación PAR es importante para asegurar que las plantas reciban la luz adecuada para la fotosíntesis. Para medir la radiación

PAR generalmente se destacan los piranómetros y los sensores cuánticos⁵¹ [46], aunque las fotorresistencias (LDR), los fotodiodos y los sensores fotométricos pueden ser considerados para medir este parámetro, ya que esos sensores emulan la respuesta del ojo humano. En las tablas 7 y 8 están consignadas las principales características de cada uno.

- **Sensores de temperatura**

La temperatura es quizá la variable física más común que se mide en una aplicación electrónica (relacionada con la instrumentación y el control de procesos), incluso en muchos casos en que el parámetro o variable de interés no es la temperatura, ésta se debe de medir para incluir indirectamente su efecto en la medida deseada.

La diversidad de sus aplicaciones ha condicionado igualmente una gran proliferación de dispositivos sensores y transductores, desde la sencilla unión bimetálica de los termostatos, hasta los dispositivos semiconductores más complejos⁵².

De los sensores de temperatura se destacan: el termopar, los resistivos (RTD (Resistance Temperature Detector), termistores y los basados en una unión semiconductor (sensores IC). Las tablas 9, 10 y 11 citan las principales características de cada tipo.

⁵⁰ QUAN, Vu Minh; GUPTA, Gourab Sen; MUKHOPADHYAY, Subhas. Review of sensors for greenhouse climate monitoring. En *Sensors Applications Symposium (SAS), 2011 IEEE*. IEEE, 2011. p. 112-118.

⁵¹ PERDIGONES, A., PERALTA, Ignacio, NONALASCO, J, MUÑOZ, M. A and PASCUAL, V, 2004, Sensores para el control climático en invernadero. *Revista de Horticultura* [online]. 2004. [Accessed 24 October 2013]. Available from: http://www.horticom.com/revistasonline/horticultura/rh179/44_49.pdf

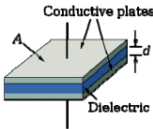
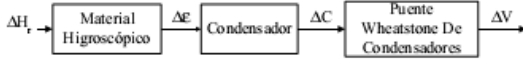
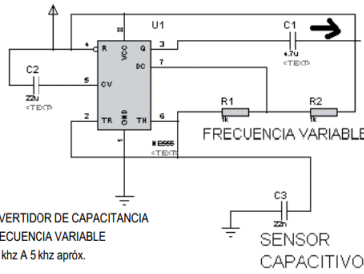
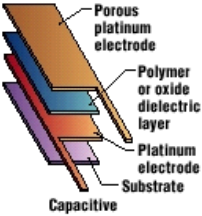
⁵² MAYNÉ, Jordi, 2003, Sensores, acondicionadores y procesadores de señal. *Silica* [online]. 2003. [Accessed 24 October 2013]. Available from: http://www.bairesrobotics.com.ar/data/sensores_2003.pdf

Tabla 4. Características estáticas y dinámicas e los sensores de humedad relativa.

SENSORES DE HUMEDAD RELATIVA						
Tipo de Sensor	Rango	Long-term Stability	Exactitud	Sensibilidad	Respuesta	Linealidad
Capacitivos	5% a 95% 0% a 100%	Buena	±1% a ±4%	0.2 a 0.5 pF/%RH	30s hasta 60 s para un cambio de paso de 63% de RH.	Excelente
Resistivos	5% a 95%	Buena	±2% a ±5%	2,95 KΩ/%RH (a 25°C, 60%RH)	10 a 30 s para un cambio de de paso de 63% de RH.	Exponencial

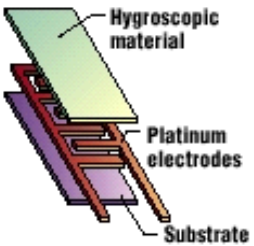
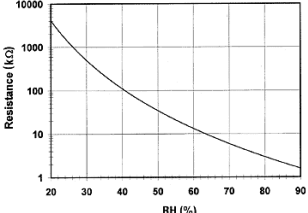
Fuente: Autor

Tabla 5. Principio de funcionamiento y acondicionamiento de señal de los sensores capacitivos de humedad relativa.

SENSORES DE HUMEDAD RELATIVA						
TIPO	Tamaño	Costo	Principio de funcionamiento		Tipo de acondicionamiento de señal	
Capacitivos	Pequeño	Relativamente bajo	<p>El principio en el cual se basa este tipo de sensores, es en el cambio que sufre la capacitancia (C en [Farad]) de un condensador al variar la constante dieléctrica del mismo. La capacitancia es dependiente de la constante dieléctrica (κ), que es a su vez depende de la humedad relativa y la temperatura (T) del dieléctrico.</p> <p>Donde: C, es el valor de la capacidad. ϵ, es la permitividad del dieléctrico. A, el área de las placas del condensador. d, la distancia entre las placas del condensador. κ, es la constante dieléctrica</p> $C := \frac{\kappa \cdot \epsilon_0 \cdot A}{d}$		<p>Para medir la variación de capacitancia se utiliza un puente de Wheatstone de condensadores.</p>  <p>Otra forma es convertir el valor de la capacitancia mencionada en una señal eléctrica útil, para ello se emplea el sensor capacitivo como componente de un oscilador astable (ej: NE555) que varía su frecuencia de acuerdo al cambio del valor de la capacitancia del sensor.</p>  <p>CONVERTIDOR DE CAPACITANCIA A FRECUENCIA VARIABLE DE 4 khz A 5 khz apróx.</p> <p>SENSOR CAPACITIVO</p>	
			<p>En el caso de un capacitor lleno de aire, k varía de acuerdo a:</p> <p>Donde: T es la temperatura absoluta (en °K), P es la presión del aire humedo (en mm de Hg) Ps es la presión del vapor de agua saturado a T (en mm de Hg) H es la humedad relativa (en %)</p> <p>En esta ecuación κ tiene una relación lineal con H (humedad relativa) del medio ambiente circundante. Esto muestra que la capacitancia tiene una relación casi lineal con la humedad relativa dada por:</p> $C_h \approx C_0(1 + \alpha_h H)$ <p>Donde: Co es la capacitancia a H=0%</p>		<p>Al obtenerse una señal de salida de frecuencia variable, se hace necesaria la utilización de un conversor de frecuencia a tensión (LM2917) para ser procesada por ejemplo por el conversor A/D de un microcontrolador. Con los últimos avances en integración, se puede encontrar sensores que incluyen circuitos de acondicionamiento de señal sobre el sustrato. También cuentan con temporizadores CMOS para producir una salida de voltaje casi lineal.</p>	

Fuente: Autor

Tabla 6. Principio de funcionamiento y acondicionamiento de señal de los sensores capacitivos de humedad relativa.

SENSORES DE HUMEDAD RELATIVA					
TIPO	Tamaño	Costo	Principio de funcionamiento		Tipo de acondicionamiento de señal
Resistivos	Pequeño	Bajo	<p>Los sensores resistivos de humedad miden el cambio en la impedancia eléctrica de un medio higroscópico tal como un polímero conductor, sal, o sustrato tratado. Higroscópico significa que el material absorbe fácilmente agua. Normalmente consisten en electrodos de metales nobles ya sea depositados sobre un sustrato por técnicas fotorresistentes o electrodos wire-wound en un cilindro de plástico o de vidrio. El sustrato se recubre con una sal o un polímero conductor.</p> <p>El sensor absorbe el vapor de agua y los grupos funcionales iónicos se disocian, lo que resulta en un aumento en la conductividad eléctrica. Generalmente tienen una relación exponencial inversa a la humedad:</p>	 <p style="text-align: center;">Resistivo</p>	<p>Para medir las variaciones en la resistencia se utiliza el puente de Wheatstone se debe medir en corriente alterna (AC) sin nivel de corriente directa (DC) para evitar la electrólisis del agua, y con ello la polarización del sensor.</p> <p>El flujo de corriente resultante es rectificado y convertido a una señal de corriente directa (DC), para luego ser amplificada, linealizada o ser tratada por conversor A/D</p> <p>Al igual que un termistor, se puede linealizar colocando una resistencia en paralelo, é empleando un divisor de tensión.</p>
			 <p>El rango de impedancia de los típicos elementos resistivos varía de 1 k a 100 MΩ .</p>		


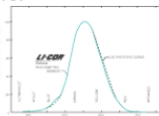

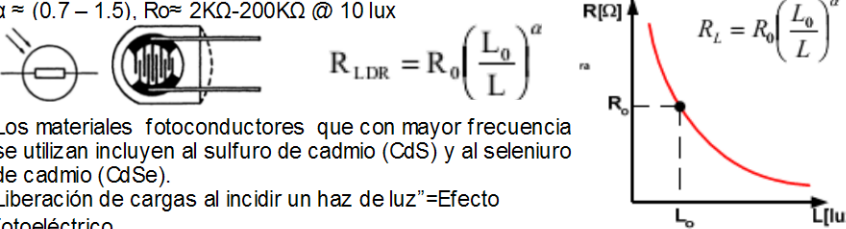


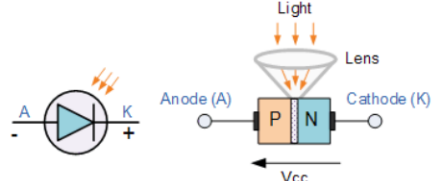
Fuente: Autor

Tabla 7. Características estáticas y dinámicas e los sensores de luz.

SENSORES DE LUZ					
SENSOR	Long-term Stability	Sensibilidad	Respuesta	Linealidad	Respuesta Espectral
Fotométricos	Buena	30 μA por 100 klux	10 μs	Buena	300nm a 750nm
Fotorresistencias LDR	Buena	(-0,7 K Ω /lux)	2 μs a 100 ms	Aceptable	350nm a 840nm
Piranómetros	Buena	5 a 35 μV / W/m ² .	10 μs	Buena	300 nm a 2800 nm
Sensor Quantum	Excelente	5 μA per 1000 $\mu\text{moles s}^{-1} \text{m}^{-2}$	10 μs	Excelente	380 nm a 720 nm
Fotodiodos	Muy buena	a 632 nm: 0,2 $\mu\text{A}/\mu\text{W}$ a 880 nm: 0,4 $\mu\text{A}/\mu\text{W}$	40-50ms	Excelente	400nm-1100nm

Fuente: Autor

Tabla 8. Principio de funcionamiento y acondicionamiento de señal de los sensores de luz.

SENSORES DE LUZ				
TIPO	Tamaño	Costo	Principio de funcionamiento	Tipo de acondicionamiento de señal
Fotométricos 	Pequeño	Alto	Miden la radiación visible o luz que tiene una respuesta similar a la del ojo humano. Utiliza un fotodiodo de silicio para proveer una respuesta espectral que coincide con la curva CIE dentro de $\pm 5\%$ con la mayoría de las fuentes de luz. La combinación de este fotodiodo y un filtro está ubicada dentro de un cabezal sensor coseno-correctado para proveer una respuesta adecuada a la radiación a varios ángulos de incidencia. 	Convertidores o conversores de corriente a voltaje I-V Conversión a señales estándar : 4-20mA (por ejemplo usando el CI XTR105) y 0-5v con amplificadores operacionales.
Fotorresistores Light Dependent Resistor LDR 	Pequeño	Bajo	Se basan en la variación de la resistencia eléctrica de un semiconductor al incidir en él radiación óptica. (radiación electromagnética con longitud de onda entre 1mm y 10nm) Cuando la intensidad de la luz aumenta, el valor de la resistencia desciende, y viceversa. Dependencia típica de la resistencia de una LDR con la luz incidente: $\alpha \approx (0.7 - 1.5)$, $R_0 \approx 2K\Omega - 200K\Omega @ 10 \text{ lux}$ $R_{LDR} = R_0 \left(\frac{L_0}{L} \right)^\alpha$  <p>Los materiales fotoconductores que con mayor frecuencia se utilizan incluyen al sulfuro de cadmio (CdS) y al seleniuro de cadmio (CdSe). Liberación de cargas al incidir un haz de luz"=Efecto fotoeléctrico</p>	Circuitos potenciométricos (Linealización) Puente de Wheatstone Limitar potencia evitar problemas autocalentamiento.
Piranómetros 	Pequeño a mediano	Alto	Miden la radiación solar (radiación global) recibida desde todo el hemisferio celeste sobre una superficie horizontal terrestre. El principio de funcionamiento de este instrumento es a través de termopares (conectados en serie o paralelo), los cuales al calentarse producto de la radiación de sol, emiten una pequeña f.e.m. (tensión o milivoltaje por efecto Seebeck) proporcional a la radiación incidente, pudiendo ser medida por algún otro instrumento (integrador o datalogger). Las medidas se expresan en W/m^2 .	Conversión a señales estándar : 4-20mA (por ejemplo usando el CI XTR105) y 0-5v con amplificadores operacionales. Filtrado: Filtro pasabajas, que elimina los ruidos de alta frecuencia generados por diversos entornos alrededor del sistema.
Sensor Quantum 	Pequeño	Alto	Miden la radiación PAR (radiación fotosintéticamente activa: 400- 00nm), en $\mu\text{moles s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ Están formados por un detector fotovoltaico (fotodiodo) cubierto de aluminio anodizada. Se usan filtros de cristal de colores para limitar la radiación que detecta en el rango correspondiente a la radiación PAR. Son comúnmente llamados sensores cuánticos porque un cuanto se refiere a la cantidad de energía transportada por un fotón.	Conversión a señales estándar : 4-20mA (por ejemplo usando el CI XTR105) y 0-5v con amplificadores operacionales. Filtrado: Filtro pasabajas, que elimina los ruidos de alta frecuencia generados por diversos entornos alrededor del sistema.
Fotodiodos	Pequeño	Bajo	Entre la zona P y zona N existe una zona no dopada intrínseca, donde se absorben los fotones con una energía que depende de la longitud de onda:  $\lambda_h(\text{nm}) = \frac{1240}{E_h(\text{eV})}$ <p>Se deben polarizar en inverso</p> <p>Esta energía libera electrones y huecos que generan una corriente eléctrica proporcional a la cantidad de luz que incide.</p>	Convertidores o conversores de corriente a voltaje I-V

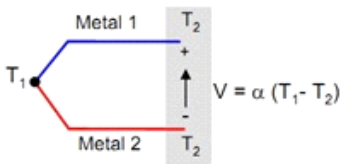
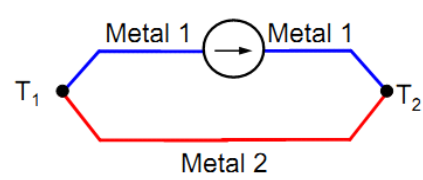
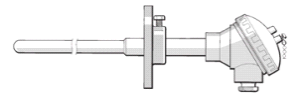
Fuente: Autor

Tabla 9. Características estáticas y dinámicas e los sensores de temperatura.

SENSORES DE TEMPERATURA							
SENSOR	Rango	Long-term Stability	Exactitud	Sensibilidad	Respuesta	Linealidad	Autocalentamiento
Termopar	(-270 a 3000 °C)	Aceptable	±0,5°C	6 a 75µV/°C (baja)	Rápida (50ms)	No lineal	No (no necesita excitación)
RTD	Pt: (-200°C a 850°C) Cu: (-200°C a 260°C) Ni: (-80 a 320)	Excelente	±0,03°C ±0,1°C ±0,5°C	Pt100: 0.385 Ω/°C Cu10: 0,0427 Ω/°C Ni100: 0,627 Ω/°C	Entre 0,5 y 5s	Pt: lineal dentro del rango Cu: Lineal para Tª cercana a Tªambiente Ni: lineal para Tª superior a 400°C	Si (necesita excitación) Bajo
Termistor	NTC: (-100°C a 450°C) PTC: (-25°C a 120 °C)	Pobre a aceptable	±0,1°C	±4%/°C a 25°C	Entre 1 y 2s	No lineal (Exponencial)	Si (necesita excitación) Alto
Circuito Integrado (IC)	De salida de voltaje: (-50 a +150°C) De salida de corriente: (-55°C a +150°C) De salida digital: (-55°C a +125°C) De salida de resistencia: (-50°C a +150°C)	Aceptable	Entre ±0.5°C y ±5°C	10 mV/°C a 28mV/°C 0,1µA/°K a 4µA/°K ± 1% 0,8%/°C	Entre 3 y 10s	Excelente	Si (necesita excitación) Bajo

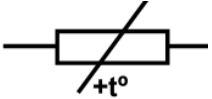
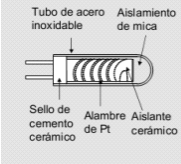
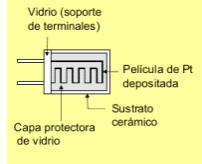
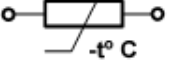
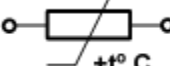
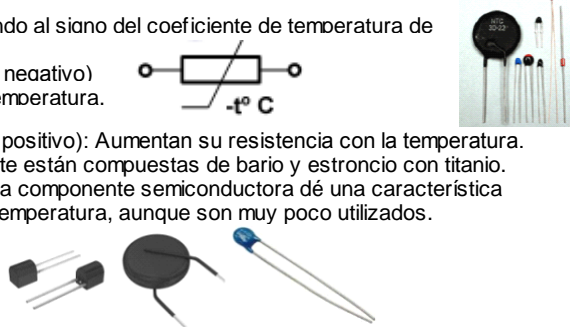
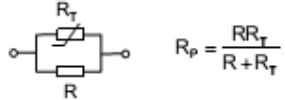
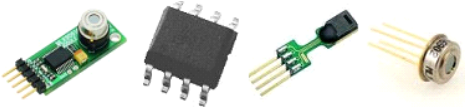
Fuente: Autor

Tabla 10. Principio de funcionamiento y acondicionamiento de señal de los termopares.

SENSORES DE TEMPERATURA				
SENSORES	Tamaño	Costo	Principio de funcionamiento	Tipo de acondicionamiento de señal
Termopar	Pequeño a grande	Moderado a alto	<p>Efecto Seebeck: Dos metales distintos homogéneos se unen y el punto de contacto produce un pequeño voltaje en función de la temperatura.</p>  <p>Si los conductores forman un circuito cerrado y una de las uniones está a una temperatura T1 y la otra está a una temperatura diferente T2, aparece una fuerza electromotriz que da lugar a la circulación de una corriente que se mantiene mientras las temperaturas sigan siendo diferentes.</p>  	<p>*Amplificadores de instrumentación: Aumentan el nivel de la señal de salida del termopar, por ejemplo: AD620</p> <p>*Filtros pasa bajas: Suprimen el ruido de 50 y 60 Hz de la red eléctrica.</p> <p>*Compensación de unión fría: Usando un sensor adicional de referencia, como un termistor o sensor IC (ej: LM35).</p> <p>Los circuitos integrados acondicionadores de señal para termopares AD594/AD595 contienen un amplificador de instrumentación y un compensador lineal de unión fría, que en conjunto suministra una salida de 10mV/°C.</p> <p>*Linealización: Normalizando la curva de respuesta mediante aproximación de polinomios usando los coeficientes de la norma IEC (tablas ITPS-68)</p>

Fuente: Autor

Tabla 11. Principio de funcionamiento y acondicionamiento de señal de los termopares.

SENSORES DE TEMPERATURA				
SENSORES	Tamaño	Costo	Principio de funcionamiento	Tipo de acondicionamiento de señal
RTD	Pequeño	Moderado a alto	<p>Se fundamentan en la variación que experimenta la resistencia de los conductores con la temperatura. El símbolo con la línea recta diagonal indica que la variación de la resistencia es debida a la temperatura y tiene coeficiente positivo, es decir un aumento de la resistencia con la temperatura. Esta dependencia se puede expresar de la forma:</p> $R = R_0 (1 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2 + \dots + \alpha_n T^n)$ <p>Los elementos típicos usados por los RTDs incluyen níquel (Ni) y cobre (Cu), pero platino (Pt) es el más utilizado.</p>  <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>• Hilos bobinados (wire-wound)</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>• Película fina (thin film)</p>  </div> </div>	<p>• Excitación en tensión o corriente Conexiones de 2, 3 y hilos alimentadas por fuentes de corriente o tensión constantes. Estas conexiones incorporan el RTD a un puente de Wheatstone alimentado por tensión o corriente que mide la variación su resistencia.</p> <p>• Amplificación: La tensión de salida de un puente de Wheatstone no se mide con respecto a tierra, si no que es la diferencia entre las tensiones de salida de los dos divisores que constituyen el puente. Para detectar la tensión de salida del puente es recomendable usar el amplificador de instrumentación.</p> <p>• Filtrado: Para la eliminación de ruido (por ejemplo la línea de potencia de 60 Hz), es conveniente usar filtros pasa bajas con frecuencias de corte de 4 Hz.</p>
Termistor	Pequeño	Bajo a moderado	<p>Su funcionamiento se basa en la variación de la resistencia que presenta un semiconductor con la temperatura. La relación entre la resistencia del termistor y la temperatura esta dada por:</p> $RT = Rto \exp[b(1/T - 1/To)]$ <p>Donde: T_0 = es la temperatura de referencia (habitualmente 25°C) expresada en °K. R_0 = es la resistencia a la temperatura de referencia. β = Temperatura característica del material. (entre 2000 °K – 5000°K) y depende de la T^a.</p> <p>Se dividen en dos grupos atendiendo al signo del coeficiente de temperatura de la resistencia:</p> <ul style="list-style-type: none"> • NTC (Coeficiente de temperatura negativo) Disminuyen la resistencia con la temperatura. • PTC (Coeficiente de temperatura positivo): Aumentan su resistencia con la temperatura. Son resistencias que principalmente están compuestas de bario y estroncio con titanio. La adición de dopantes hace que la componente semiconductor dé una característica de resistencia con respecto a la temperatura, aunque son muy poco utilizados.   	<p>• Excitación en tensión o corriente: Normalmente medidas a 3 y 4 hilos con fuente de corriente. Puente de Wheatstone, aunque con las restricciones que esta configuración impone para incrementos de resistencia no demasiado pequeños.</p> <p>• Amplificación: La tensión de salida del puente de Wheatstone se debe aplicar a un amplificador de instrumentación para aumentar su nivel.</p> <p>• Filtrado: Para la eliminación de ruido (por ejemplo la línea de potencia de 60 Hz), es conveniente usar filtros pasa bajas con frecuencias de corte de 4 Hz.</p> <p>• Linealización Se puede linealizar el termistor colocabdo una resistencia en paralelo, a costa de perder sensibilidad.</p> 
Circuito Integrado (IC)	Pequeño	Bajo	<p>Los sensores de circuito integrado se fundamentan en la característica de la unión p-n de los semiconductores. Existe una amplia variedad de integrados sensores de temperatura. Estos sensores se pueden agrupar en cinco categorías principales: salida de voltaje, salida de corriente, salida de resistencia salida digital y diodos simples (aunque en este caso, obviamente, se trata de diodos diseñados especialmente para medición de temperatura).</p> 	<p>Los sensores con salida digital tienen internamente circuitos integrados de linealización que producen una salida lineal proporcional a la temperatura. Cuentan con convertor A/D, y módulos I2C, SPI, para comunicar los datos de la variable.</p> <p>Los sensores con salida de corriente y voltaje necesitan conectar su salida a un amplificador de instrumentación para aumentar su nivel.</p> <p>• Linealización: Los sensores con salida de resistencia se pueden linealizar colocando una resistencia en paralelo, de tal manera que el voltaje de salida será linealmente proporcional a la temperatura.</p>

Fuente: Autor

2.1.4 Elección del sensor de temperatura

La elección del sensor de temperatura debe considerar algunos requisitos y recomendaciones:

Para la medición de la temperatura la Organización Mundial de Meteorología (OMM)⁵³ sugiere utilizar un sensor de temperatura

Características del sensor:

- Rango de operación: -40 a 100°C
- Resolución: 0,1 °C
- Exactitud: $\pm 0,4^\circ\text{C}$

La temperatura en un invernadero es mantenida a menudo entre T_{max} (24°C durante el día/18°C durante la noche) y $T_{\text{mín}}$ (20°C durante el día/ 16°C durante la noche)⁵⁴.

Esta información permite reducir las opciones para la selección del sensor de temperatura adecuado para el proyecto. Revisando los sensores de temperatura y sus características claves (tablas 11, 12 y 13), los termopares y los RTD son más adecuados para aplicaciones industriales donde se requiere que el sensor sea expuesto a un ambiente de amplios rangos de temperatura o aplicaciones en las que pequeñas diferencias de temperatura necesitan ser medidas con gran exactitud.

Los termistores aunque ofrecen buena exactitud y una sensibilidad alta, su no linealidad hace que sea necesario el uso de etapas de linealización, acondicionamiento de señal, conversión analógica a digital, etc.

Los sensores de temperatura de circuito integrado (IC) de salida digital brindan las ventajas de ser menos complejos y de tamaño reducido comparados con los sensores de salida analógica⁵⁵. Por lo tanto, un sensor de salida digital para la temperatura sería una elección ideal para el diseño, ya que tal sensor requiere menos área (de PCB) y es funcionalmente más simple de integrar en el diseño del nodo sensor.

⁵³ ORGANIZACIÓN MUNDIAL METEOROLÓGICA (OMM), 2007, Guía de instrumentos meteorológicos y métodos de observación. [online]. 2007. Available from: <http://www.wmo.ch/pages/prog/www/IMOP/publications/CIMO-Guide/Draft-7-edition.html>

⁵⁴ LEE, Dal—Hoon. *Energy saving through integrated greenhouse climate*. 1993. Tesis Doctoral. UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA.

⁵⁵ TANGIRALA, Phani. Development and validation of a special purpose sensor and processor system to calculate equilibrium moisture content of wood. 2005.

2.1.5 Elección del sensor de humedad relativa

Al igual que en el caso del sensor de temperatura, la elección del sensor de humedad relativa se ha llevado a cabo teniendo en cuenta las recomendaciones proporcionadas por la OMM⁵⁶, que sugiere lo siguiente:

Unidad de medida: Tanto por ciento (%)

Características del sensor:

- Rango de operación: 5 a 100%

Sistema de medida y sensor:

- Tecnología: Sensor capacitivo
- Resolución: 1%
- Exactitud: $\pm 3\%$

Los sensores capacitivos de humedad relativa tienen muchas ventajas comparados con los sensores resistivos. Los sensores capacitivos proveen valores de humedad relativa más exactos y los valores están alrededor de $\pm 1.5\%$ de RH y $\pm 3\%$ de RH. Los sensores de tipo resistivo proveen valores de exactitud inferior comparado con los sensores de tipo capacitivo, y los valores están alrededor de $\pm 5\%$ de RH. Los sensores de humedad relativa de tipo de resistivo solo pueden ser operados en ambientes sin condensación a diferencia de los sensores de tipo de capacitivo. Los sensores de tipo resistivo brindan menor rango de humedad relativa (20% a 80%) comparado con el de tipo capacitivo el cual que brinda un rango de 0% a 100%. Además, los sensores de tipo capacitivo brinda una linealidad alta y más estabilidad a largo plazo comparado con el de tipo resistivo⁵⁷ [50].

Teniendo en cuenta todas las ventajas en la medición, y la eficacia en función de los costos, los sensores de tipo de capacitivo son más apropiados para el diseño del nodo sensor de humedad relativa para monitoreo en invernaderos. Un sensor de humedad relativa que produce una salida digital sería más ventajoso comparado con un sensor de humedad de tipo capacitivo análogo. Las razones para esto están basadas en la complejidad del circuito y el área o tamaño del dispositivo final.

▪ **Sensor elegido**

De la discusión de las secciones anteriores sobre los sensores de temperatura y los sensores de humedad relativa, es claramente evidente que los sensores de temperatura

⁵⁶ ORGANIZACIÓN MUNDIAL METEOROLÓGICA (OMM), 2007, Guía de instrumentos meteorológicos y métodos de observación. [online]. 2007. Available from: <http://www.wmo.ch/pages/prog/www/IMOP/publications/CIMO-Guide/Draft-7-edition.html>

⁵⁷ TANGIRALA, Phani. Development and validation of a special purpose sensor and processor system to calculate equilibrium moisture content of wood. 2005.

digitales y los sensores capacitivos de humedad relativa digitales son las mejores elecciones para el diseño del nodo sensor.

La tabla 12 contiene una lista de algunos sensores de temperatura y humedad relativa de tipo capacitivo considerados en la elección.

Tabla 12. Comparación de diferentes sensores de humedad relativa y temperatura

Tipo de sensor	Nombre del fabricante	Resolución y tipo de salida	Rango	Exactitud (Accuracy)
Temperatura	ANALOG DEVICES	10-bit digital	-40°C a 125°C	± 1°C
	MAXIM	9-12 bit digital	-55°C a 125°C	± 0.5°C
	SENSIRION	8-14 bit digital	-40°C a 123.8°C	± 0.4°C a 25°C
	NXP (PHILLIPS)	11- bit digital	-55°C a 125°C	± 3°C
	NATIONAL SEMICONDUCTOR	10- bit digital	-55°C a 125°C	± 1.5°C
Humedad Relativa	HONEYWELL	Voltaje análogo	0 % -100 % RH	±2.0 % RH
	SENSIRION	8-12 bit digital	0 % - 100 % RH	±3.0 % RH
	HUMIREL	Voltaje análogo	0 % -100 % RH	3.0 % RH

Fuente: (Tangirala 2005)

De la tabla 12, se puede observar que hay un amplio rango de dispositivos que pueden ser elegidos para sensores de temperatura, pero hay muy pocos sensores de humedad relativa que producen una salida digital.

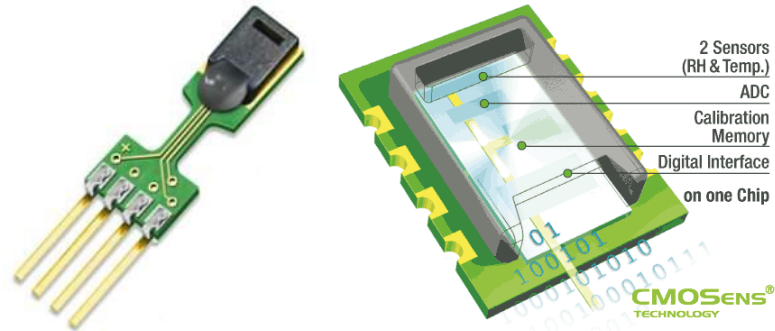
Como figura en los requisitos del sensor, el rango de temperatura debe ser por lo menos -40°C a 100°C. Muchos de los sensores de temperatura en la tabla 12 pueden funcionar en ese rango. La exactitud y la resolución del sensor de Sensirion son mucho mejores comparadas con los demás.

De los sensores de humedad relativa del tipo capacitivo considerados, el sensor de Sensirion produce la salida digital requerida con la suficiente resolución y exactitud.

El sensor SHT71 de Sensirion (que cuenta con tecnología CMOSens®), ofrece la opción de medir en conjunto temperatura y humedad relativa con salida digital. La figura 32 muestra el sensor SHT71. Utiliza un sensor de tipo de capacitivo para medir la humedad relativa que permite tener exactitud más alta y el rango requerido⁵⁸, y un sensor de temperatura basado en bandgap (banda prohibida).

⁵⁸ SENSIRION AG, 2011, Datasheet SHT7x (SHT71, SHT75) Humidity and Temperature Sensor IC. [online]. 2011. [Accessed 24 October 2013]. Available from: http://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/Humidity/Sensirion_Humidity_SHT7x_Datasheet_V5.pdf

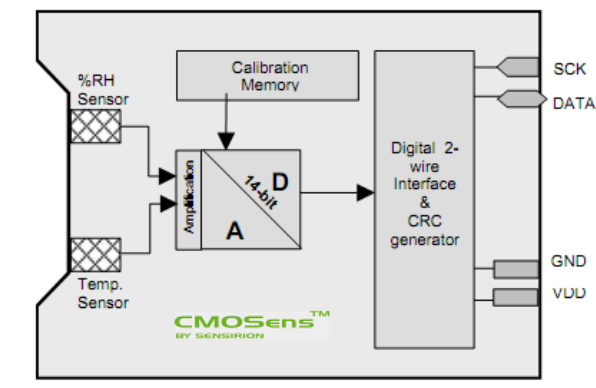
Figura 32. Sensor de humedad relativa y temperatura SHT71.



Fuente: (Sensirion AG 2004)

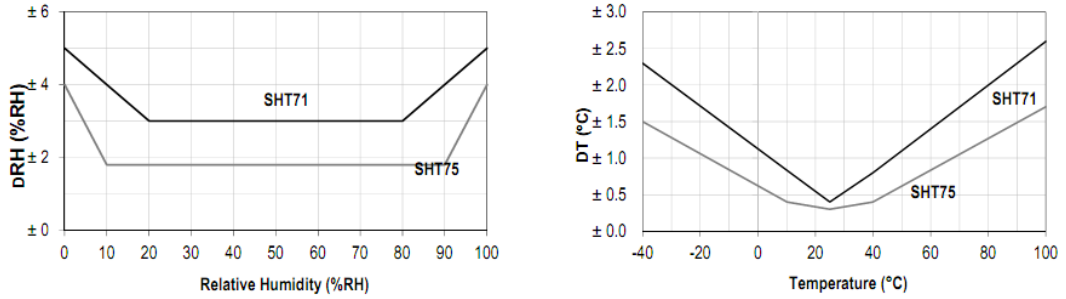
La figura 33 describe la composición de este sensor a través de un diagrama de bloques. Ambos sensores están conectados con un convertor análogo-digital de 14 bits y un circuito de interfaz serial sobre el mismo chip (ver figura 32), con código de redundancia cíclica para la detección de errores (CRC, Cyclic Redundancy Check) [52] de modo que el sistema de medición se desentiende del tema ruidos (o interferencias electromagnéticas puedan alterar el valor de los datos), linealización analógica, calibración, e impedancias. La información de temperatura se obtiene en 12 ó 14-bits en un rango de -40°C a $+120^{\circ}\text{C}$, con una exactitud (mejor caso) de $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$. La información de humedad relativa ambiente se obtiene en 8 ó 12-bits, con una precisión del 3% (mejor caso). Los sensores funcionan tanto a 3,3V como a 5V, su consumo de corriente está alrededor de $28 \mu\text{A}$ (80uW a 12bit, 3V, 1 medida/s) y su estabilidad a largo plazo viene garantizada por la calibración realizada internamente, a cada medición. La figuras 34 y 35, y las tablas 13 y 14 ilustran el desempeño de este sensor para la medición de humedad relativa y temperatura.

Figura 33. Diagrama de bloques del sensor SHT71.



Fuente: (Sensirion AG 2004)

Figura 34. Graficas de comportamiento para la medición de humedad relativa y temperatura del sensor SHT71.



Fuente: (Sensirion AG 2004)

Tabla 13. Especificaciones de desempeño para la medición de temperatura.

Parameter	Condition	min	typ	max	Units
Resolution ¹		0.04	0.01	0.01	°C
		12	14	14	bit
Accuracy ² SHT71	typ		±0.4		°C
	max	see Figure 3			
Accuracy ² SHT75	typ		±0.3		°C
	max	see Figure 3			
Repeatability			±0.1		°C
Operating Range		-40		123.8	°C
		-40		254.9	°F
Response Time ⁵	tau 63%	5		30	s
Long term drift			< 0.04		°C/yr

Fuente: (Sensirion AG 2004)

Tabla 14. Especificaciones de desempeño para la medición de humedad relativa

Parameter	Condition	min	typ	max	Units
Resolution ¹		0.4	0.05	0.05	%RH
		8	12	12	bit
Accuracy ² SHT71	typ		±3.0		%RH
	max	see Figure 2			
Accuracy ² SHT75	typ		±1.8		%RH
	max	see Figure 2			
Repeatability			±0.1		%RH
Hysteresis			±1		%RH
Nonlinearity	raw data		±3		%RH
	linearized		<<1		%RH
Response time ³	tau 63%		8		s
Operating Range		0		100	%RH
Long term drift ⁴	normal		< 0.5		%RH/yr

Fuente: (Sensirion AG 2004)

2.1.6 Elección del sensor de luz

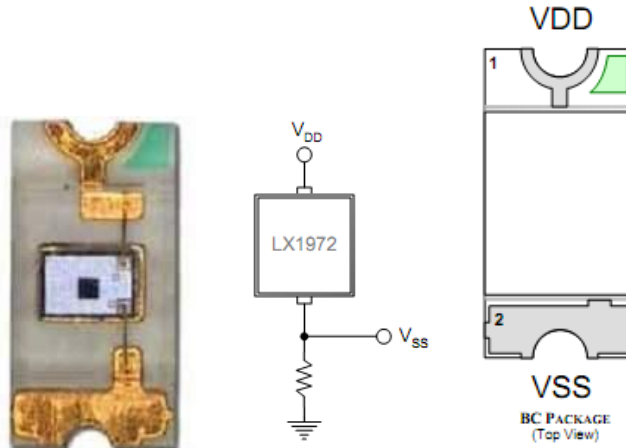
Cinco tipos de sensores fueron estudiados: sensores fotométricos, fotorresistores (LDR), piranómetros, sensores cuánticos (quantum sensors) y fotodiodos. Los piranómetros y los sensores cuánticos son lo más adecuados para la medición de la luz solar⁵⁹ [53], sin embargo, estos sensores son muy costosos. Los LDR (Light Dependent Resistor) o fotorresistores, son bastante económicos en comparación de los sensores fotométricos, pero su salida de tipo logarítmico hace necesario el uso de etapas de linealización, lo que finalmente incrementa el área del circuito. Por último los fotodiodos, que también son de bajo costo, tienen mejores prestaciones (ver tablas 9 y 10) comparadas con los fotorresistores (LDR), que hace de ellos la mejor para este proyecto. Sin embargo, para aplicaciones de agricultura de precisión es preferible usar sensores cuánticos o piranómetros⁶⁰[46].

Sensor elegido

LX1972 fue el sensor elegido para este proyecto debido a que su respuesta espectral (similar a la del ojo humano) es aproximadamente de 350 a 750 nm, que está dentro del rango del PAR. Es un fotosensor basado en una matriz de diodos PIN con una función de transferencia lineal, exacta y muy repetible.

El sensor LX1972 junto con su circuito esquemático de conexión y su símbolo están representados en la figura 35.

Figura 35. Sensor LX1972



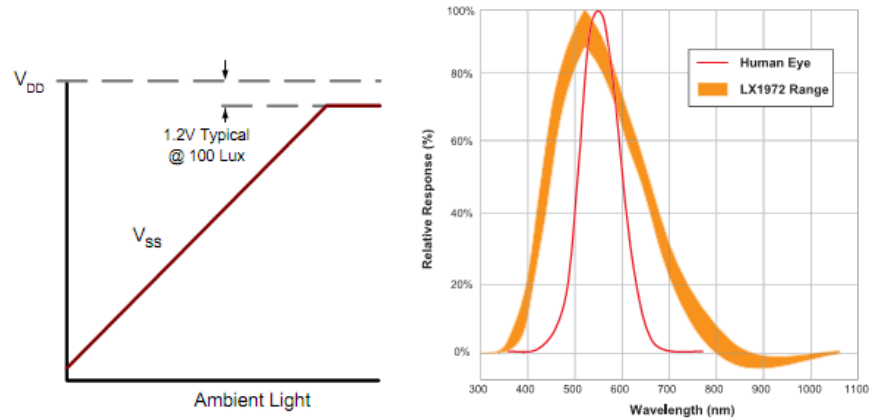
Fuente: (Microsemi Semiconductor 2004)

⁵⁹ CAMPBELL SCIENTIFIC, 2010, *Solar Radiation Sensors* [online]. 2010. Available from: <http://www.campbellsci.com/solar-radiation>

⁶⁰ PERDIGONES, A., PERALTA, Ignacio, NONALASCO, J, MUÑOZ, M. A and PASCUAL, V, 2004, Sensores para el control climático en invernadero. *Revista de Horticultura* [online]. 2004. [Accessed 24 October 2013]. Available from: http://www.horticom.com/revistasonline/horticultura/rh179/44_49.pdf

La curva característica y la respuesta espectral están representadas por la figura 36.

Figura 36. Curva característica (izquierda) y respuesta espectral vs longitud de onda (derecha).



Fuente: (Microsemi Semiconductor 2004)

2.2 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO

Antes de describir el desarrollo del sistema, es importante establecer las especificaciones de diseño y requerimientos para el desarrollo del sistema. Esta sección explica en detalle esas especificaciones de diseño y requerimientos detalladamente⁶¹.

▪ Requerimientos del coordinador

El nodo coordinador debe ser capaz de hacer:

- Procesamiento de datos
- Almacenamiento de datos

▪ Requerimientos del nodo sensor

El nodo sensor debe ser capaz de hacer:

- Recibir una petición de recolección de datos del coordinador.
- Recolectar o recopilar datos del entorno (ambiente).
- Realizar la conversión analógica a digital a los datos recopilados (recolectados).
- Enviar los paquetes de datos al coordinador.

⁶¹ MINH VU, Quan, 2011, *Automated Wireless Greenhouse Management System. Master thesis*. 2011. School of engineering and advanced technology, Massey University.

Aunque algunos aspectos de una red de sensores inalámbricos pueden ser genéricos, es importante considerar cuidadosamente los requisitos específicos de la aplicación, especialmente cuando se es tan exigente como el monitoreo ambiental. Tales aplicaciones generalmente consisten en la implementación de una serie de sensores en campo para medir periódicamente los parámetros meteorológicos e hidrológicos, tales como la velocidad y dirección del viento.

La mayoría de ellos cambian relativamente lentamente en el tiempo, lo que permite el muestreo escaso (una muestra cada dos a cinco minutos más a menudo es suficiente). Sin embargo, fenómenos interesantes, como deslizamientos de rocas y avalanchas, ocurren rara vez y son difíciles de predecir, los despliegues debe durar el tiempo suficiente para capturarlos⁶².

Los nodos que componen las WSN aplicadas al sensado o monitoreo remoto ambiental deben cumplir determinadas características y requisitos para ser confiables y para que su desarrollo sea factible⁶³:

Bajo costo: Para que una WSN pueda estar formada por muchos nodos y sea escalable, es esencial el bajo costo de los mismos; de lo contrario; el costo total de la red sería muy elevado y su desarrollo inviable o no práctico.

Autonomía: El bajo consumo es muy importante, generalmente la energía es suministrada por baterías y deben ser capaces de alimentar los nodos durante el tiempo de implementación y funcionamiento de acuerdo a los requerimientos de la aplicación. Para extender la vida útil de los nodos es importante que el tensión de alimentación mínima de los nodos sea lo más cercano posible al voltaje o tensión de corte de las baterías (tensión mínima que las baterías pueden entregar). De esta manera, el nodo consumirá toda la energía que las baterías pueden entregar. Como ejemplo, un nodo cuya tensión mínima de corte sea 2.7 Volt, y sea alimentado por dos baterías AA en serie, las cuales tendrán 1.8 V como tensión de corte (0.9 volt cada batería), dejará sin uso 50 % de la energía que las baterías pueden entregar⁶⁴.

Confiabilidad y robustez: Debido a que la red puede necesitar desplegarse en ambientes hostiles y condiciones climáticas adversas, la robustez y confiabilidad de los nodos son necesarias para evitar que se deba realizar tareas de mantenimiento del hardware de red.

⁶² BARRENETXEA, Guillermo, et al. Wireless sensor networks for environmental monitoring: the sensorscope experience. En *Communications, 2008 IEEE International Zurich Seminar on*. IEEE, 2008. p. 98-101.

⁶³ IACONO, Lucas, GODOY, Pablo, MARIANETTI, Osvaldo and GARCÍA GARINO, Carlos, 2010, Estudio de plataformas de hardware empleadas en redes de sensores inalámbricas. En : *XVI Congreso Argentino de Ciencias de la Computación* [online]. 2010. p. 784-793. [Accessed 25 October 2013]. ISBN 978-950-9474-49-9. Available from: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/19349>

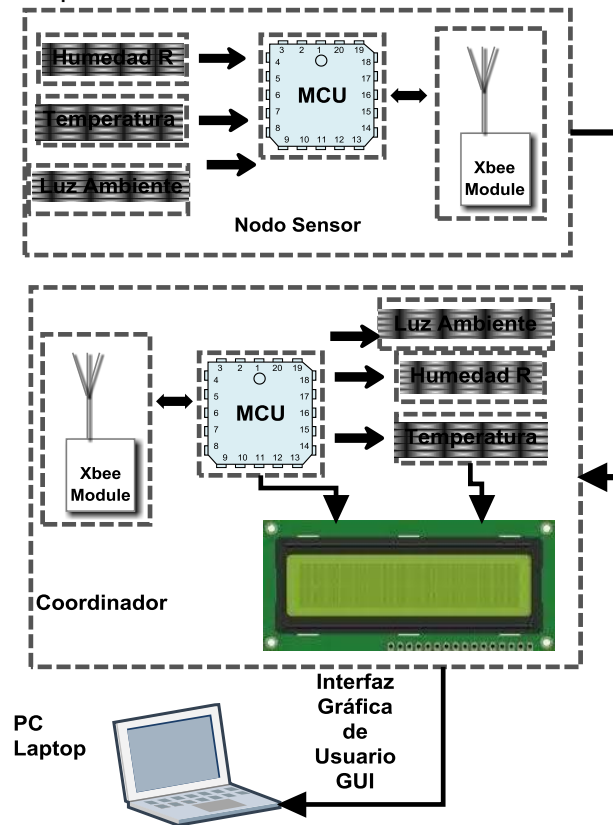
⁶⁴ POLASTRE, Joseph; SZEWCZYK, Robert; CULLER, David. Telos: enabling ultra-low power wireless research. En *Information Processing in Sensor Networks, 2005. IPSN 2005. Fourth International Symposium on*. IEEE, 2005. p. 364-369.

2.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA

El sistema se compone de un nodo sensor y un dispositivo coordinador. El nodo sensor es básicamente una unidad de adquisición de datos. Es responsable de recopilar variables del clima como temperatura, humedad relativa, y luz, y transmite los datos recopilados al coordinador por medio de módulos Zigbee.

El coordinador, actúa como estación central del sistema. Se encarga de recibir los datos adquiridos por el nodo sensor (formando una red de topología estrella) para procesarlos, almacenarlos y proveer una conveniente y fácil manera que permite a los usuarios acceder fácilmente a ellos y mostrarlos en tiempo real en una LCD y una interfaz gráfica de usuario (GUI). El diagrama esquemático del sistema es mostrado en la figura 37.

Figura 37. Diagrama esquemático del sistema.



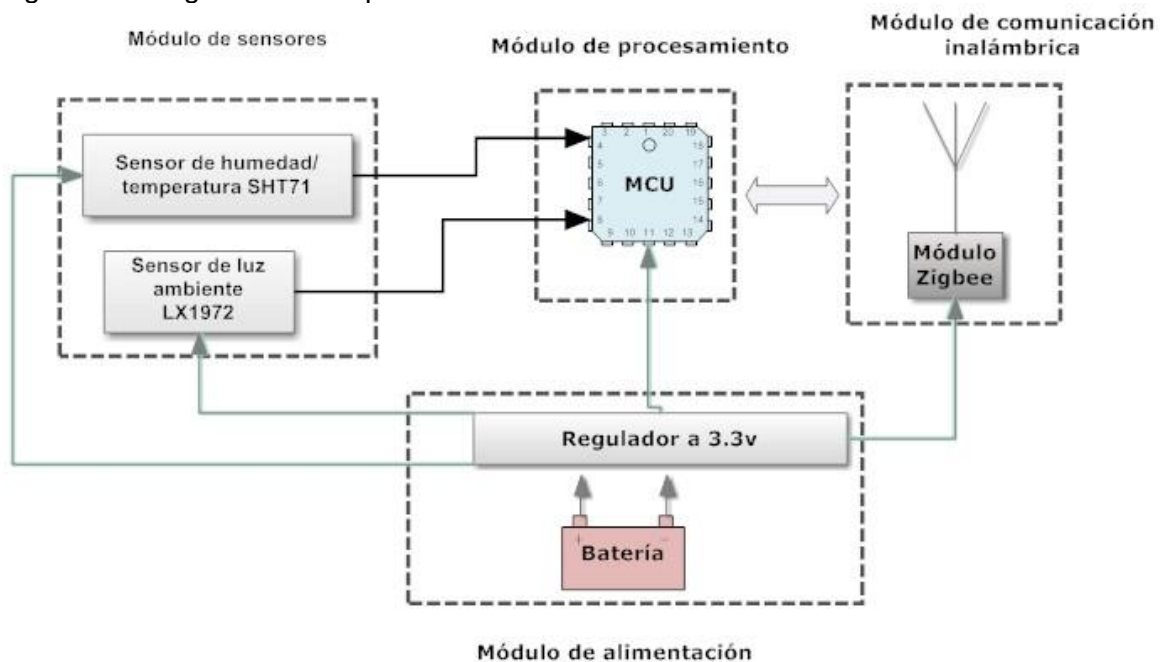
Fuente: Autor

3. DISEÑO DISPOSITIVO FINAL (NODO SENSOR)

El nodo sensor es la plataforma básica de las redes inalámbricas de sensores (WSN)⁶⁵. El nodo sensor está conformado por cuatro partes: módulo de sensores, módulo de procesamiento, módulo de comunicación inalámbrica y el módulo de alimentación. El módulo de sensores es responsable de recolectar información sobre los parámetros de temperatura, humedad relativa e intensidad de luz.

El módulo de procesamiento controla el funcionamiento del nodo sensor, almacena y procesa los datos recolectados. El módulo de comunicación inalámbrico se comunica con otros nodos, intercambia información de control y envía y recibe datos. El módulo de alimentación proporciona la energía para el módulo de sensor, el procesamiento y el módulo de comunicación inalámbrica. El diagrama de bloques del nodo sensor se muestra 38.

Figura 38. Diagrama de bloques del nodo sensor.



Fuente: Autor

⁶⁵ XIAO, Lei; GUO, Lejiang. The realization of precision agriculture monitoring system based on wireless sensor network. En *Computer and Communication Technologies in Agriculture Engineering (CCTAE), 2010 International Conference On. IEEE*, 2010. p. 89-92.

3.1 MÓDULO DE PROCESAMIENTO

Tanto el nodo sensor como el coordinador requieren una Unidad Central de Procesamiento (CPU) para realizar varias tareas como adquisición, procesamiento y transmisión de datos. Por consiguiente, un microcontrolador fue integrado a cada dispositivo, de manera que incluya o integre en un solo chip, memoria ROM, temporizadores, conversor análogo a digital y muchos otros componentes necesarios para comunicarse con el exterior. Hay un gran número de microcontroladores disponibles comercialmente en el mercado actual. Para esta aplicación entre los requerimientos más importantes se encuentran⁶⁶:

- Capacidad de memoria y procesamiento limitado, pero suficiente (8 Mhz, 10Kb, 1Mb).
- Modos de bajo consumo de energía (reduciendo velocidad, voltaje o apagando periféricos sin uso).

El microcontrolador seleccionado para esta aplicación es el MC9S08JM16, perteneciente a la familia HC9S08 de Freescale®. Esta familia de microcontroladores es muy útil para este tipo de aplicaciones⁶⁷ por varias razones:

- Bajo consumo, a través de sus modos de operación RUN, WAIT, STOP.
- IDE, que soporta lenguaje C y ensamblador.
- Buenas prestaciones para la depuración en tiempo real (Background Debug Mode, BDM).
- Capacidad de memoria y procesamiento suficiente para soportar la pila de protocolos ZigBee®.
- Arquitectura Von Neumann - CISC con Núcleo de procesamiento tipo HCS08 de Freescale.
- Son ampliamente utilizados en aplicaciones industriales y de electrónica de consumo, donde el ahorro de energía y el alto desempeño sean las especificaciones requeridas.

3.1.1 Microcontrolador MC9S08JM16

El microcontrolador MC9S08JM16⁶⁸ es un microcontrolador de 8 bits de bajo costo y bajo consumo de energía. Algunas características (ver figura 39) de este microcontrolador son:

- Velocidad de oscilador máxima de 48MHz con bus interno de 24MHz.

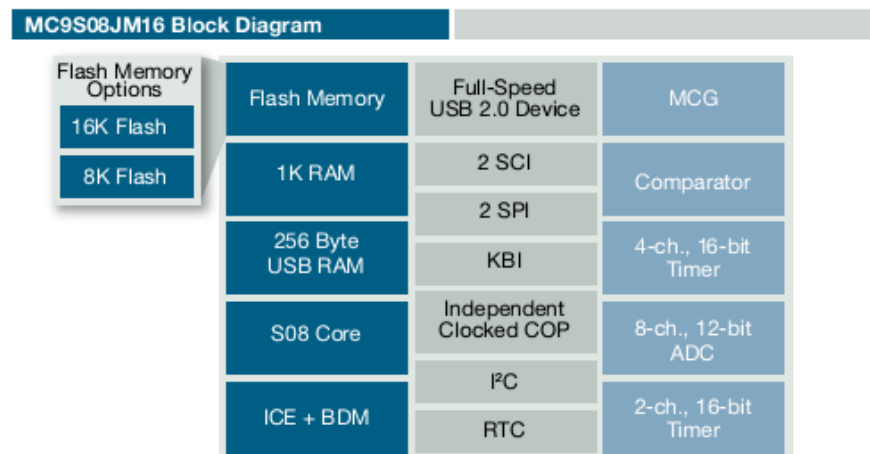
⁶⁶ XIAO, Lei; GUO, Lejiang. The realization of precision agriculture monitoring system based on wireless sensor network. En *Computer and Communication Technologies in Agriculture Engineering (CCTAE), 2010 International Conference On*. IEEE, 2010. p. 89-92.

⁶⁷ SLADE, Mel; JONES, Mark Hedley; SCOTT, Jonathan B. *Choosing the right microcontroller: A comparison of 8-bit Atmel, Microchip and Freescale MCUs*. Faculty of Engineering, The University of Waikato, 2011.

⁶⁸ FREESCALE SEMICONDUCTOR, 2008, *8-bit S08 embedded controllers. MC9S08JM16 Fact Sheet* [online]. 2008. Available from: http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/fact_sheet/MC9S08JM16FS.pdf?fsp=1

- Puerto USB Full-Speed 2.0 con regulador de 3.3v interno y 256 Bytes memoria RAM dedicada al USB.
- 16KB de memoria Flash, 1KB de memoria RAM.
- 8 canales ADC de 12 bits.
- Comparador análogo.
- Módulos SCI para comunicación RS232, con full-duplex NRZ.
- 1 Modulo SPI con full-duplex.
- Modulo I2C, que puede alcanzar una tasa de 100 kbps.
- 1 temporizador de 2 canales y 1 temporizador de 4 canales con resolución de 16bits.
- 6 Canales PWM
- 1 temporizador RTC con modo de conteo seleccionable binario o en décadas.
- 37 pines E/S de propósito general, 7 interrupciones por teclado, y 8 bits de E/S rápidos de propósito general conectado al bus local de la CPU de alta velocidad.

Figura 39. Diagrama de bloques del microcontrolador MC9S08JM16.



Fuente: (Freescale Semiconductor 2008)

3.2 MÓDULO DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA

Para la comunicación entre el nodo sensor y el coordinador, varios módulos Xbee ZB de Digi fueron seleccionados y utilizados. Estos módulos están diseñados para operar dentro del estándar ZigBee®, poseen la certificación de la Zigbee Alliance⁶⁹, lo que garantiza que estos módulos puedan comunicarse con cualquier plataforma certificada por la Zigbee Alliance. Poseen un chip Ember EM250, el cual incluye un microcontrolador dedicado y un transceptor 802.15.4. Proporcionan un bajo costo, respuesta rápida y fiable para muchos tipos de aplicaciones inalámbricas.

⁶⁹ DIGI INTERNATIONAL INC, 2008, Digi International Inc. [online]. 2008. Available from: <http://www.digi.com/news/pressrelease.jsp?prid=279>.

Figura 40. Módulos Xbee XB24-AWI-001.



Fuente: (Digi International Inc 2008)

Sus principales características son las siguientes:

Tabla 15. Características de los módulos Xbee y Xbee Pro de la serie 1.

Platform	XBee® 802.15.4 (Series 1)	XBee-PRO® 802.15.4 (Series 1)
Performance		
RF Data Rate	250 kbps	250 kbps
Indoor/Urban Range	100 ft (30 m)	300 ft (100 m)
Outdoor/RF Line-of-Sight Range	300 ft (100 m)	1 mi (1.6 km)
Transmit Power	1 mW (+0 dBm)	60 mW (+18 dBm)*
Receiver Sensitivity (1% PER)	-92 dBm	-100 dBm
Features		
Serial Data Interface	3.3V CMOS UART	3.3V CMOS UART
Configuration Method	API or AT Commands, local or over-the-air	API or AT Commands, local or over-the-air
Frequency Band	2.4 GHz	2.4 GHz
Interference Immunity	DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)	DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)
Serial Data Rate	1200 bps - 250 kbps	1200 bps - 250 kbps
ADC Inputs	(6) 10-bit ADC inputs	(6) 10-bit ADC inputs
Digital I/O	8	8
Antenna Options	Chip, Wire Whip, U.FL, & RPSMA	Chip, Wire Whip, U.FL, & RPSMA
Networking & Security		
Encryption	128-bit AES	128-bit AES
Reliable Packet Delivery	Retries/Acknowledgments	Retries/Acknowledgments
IDs and Channels	PAN ID, 64-bit IEEE MAC, 16 Channels	PAN ID, 64-bit IEEE MAC, 12 Channels
Power Requirements		
Supply Voltage	2.8 - 3.4VDC	2.8 - 3.4VDC
Transmit Current	45 mA @ 3.3VDC	215 mA @ 3.3VDC
Receive Current	50 mA @ 3.3VDC	55 mA @ 3.3VDC
Power-Down Current	<10 uA @ 25° C	<10 uA @ 25° C

Fuente: (Digi International Inc 2008)

3.3 MÓDULO DE SENSORES

El módulo de sensores está formado por los siguientes dispositivos:

SHT71: Sensor de humedad relativa y temperatura.

LX1972: Sensor de luz.

3.4 MÓDULO DE ALIMENTACIÓN

La limitación del nodo sensor puede ser discutida en términos de la energía, que ha de ser considerada como crucial en la implementación del mismo. El nodo sensor tiene que tener un bajo consumo, ser portátil y flexible. Para satisfacer estos requerimientos, una fuente de energía portátil se requiere para alimentarlo.

En general, una batería permite el suministro de energía principal para todo el nodo. Además, también se reduce la complejidad del sistema. Teniendo en cuenta las características de las distintas baterías disponibles en el mercado, y los propósitos experimentales de esta aplicación, se decidió utilizar una batería alcalina de 9v (de tipo Zn/MnO₂)⁷⁰.

3.5 DISEÑO DE LOS CIRCUITOS DEL DISPOSITIVO FINAL

Antes de discutir sobre los diseños y construcción del PCB, es necesario hacer una compilación de circuitos esquemáticos diseñados, que ilustran el funcionamiento de de los diferentes dispositivos que conforman el nodo sensor.

3.5.1 Circuitos de alimentación

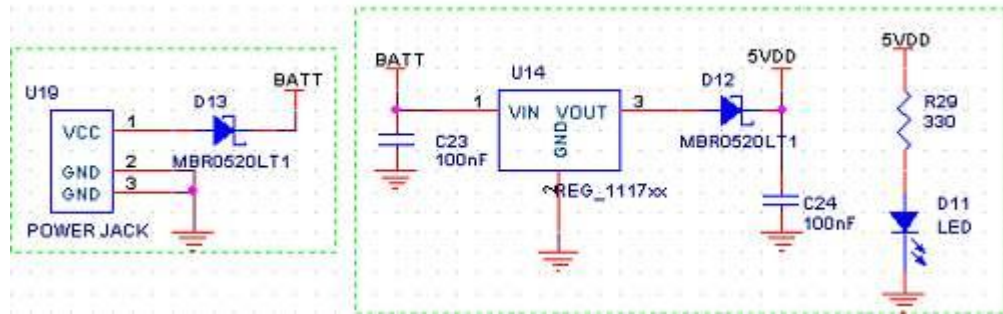
El nodo sensor puede ser alimentado por medio de una conexión USB tipo B o con una fuente externa, que para este caso es una batería alcalina de 9v. La batería es conectada a una clavija o power jack (enchufe centro-positivo en el conector de alimentación de la placa) y la corriente es limitada por un diodo Schottky MBR0520LT1. Luego el voltaje suministrado por la batería es mantenido en un nivel de 5v por el regulador integrado L1117 con encapsulado SOT-223⁷¹.

Un led actúa como indicador de conexión y suministro del voltaje regulado de 5v. La figura 41 ilustra el circuito esquemático de alimentación por medio de una fuente externa (batería).

⁷⁰ ENERGIZER HOLDINGS, INC, 2005, *Energizer Holdings, Inc* [online]. 2005. Available from: <http://data.energizer.com/PDFs/522.pdf>

⁷¹ NIKO-SEM, 2001, *L1117 - 1A Fixed and Adjustable Low Dropout Linear Regulator (LDO)* [online]. 2001. Available from: <http://elk.informatik.fh-augsburg.de/da/ma-4/Datasheets/Other/L1117.pdf>

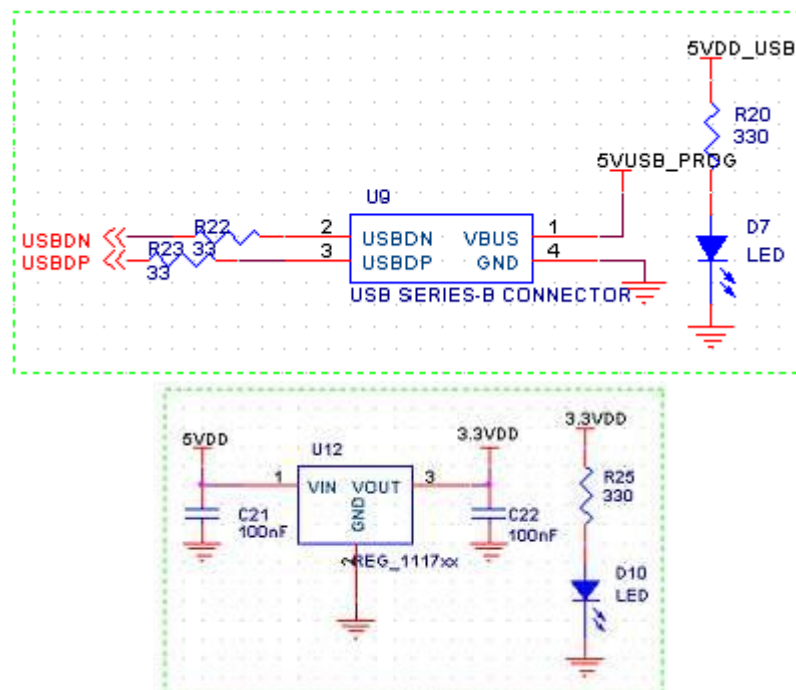
Figura 41. Circuito de alimentación por medio de batería de 9V y regulación (L1117).



Fuente: Autor

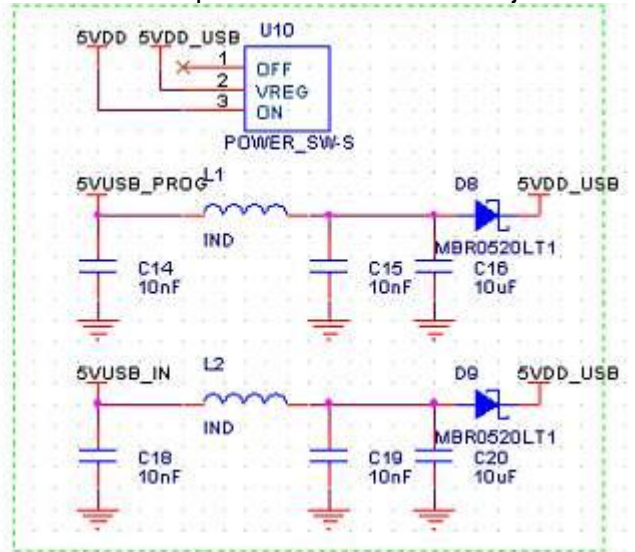
El conector USB tipo B provee al nodo sensor de un voltaje de 5v proveniente desde el otro extremo por medio de un conector USB tipo A conectado al PC. Este voltaje reducido a un nivel de 3.3v por un regulador L1117 configurado para trabajar a ese nivel. El regulador de voltaje con salida de 3.3v es necesario para alimentar a los sensores de humedad relativa/temperatura y luz ambiente, al igual que el microcontrolador MC9S08JM16. La figura 42 muestra el circuito de conexión de conector USB tipo B. En la figura 43 se muestra el circuito de encendido a través de un interruptor de posición (On/Off) para el conector USB tipo B.

Figura 42, Circuito de alimentación por medio del conector USB serie B y regulación a 3.3v.



Fuente: Autor

Figura 43. Interruptor de encendido para seleccionar el voltaje del conector USB serie B.

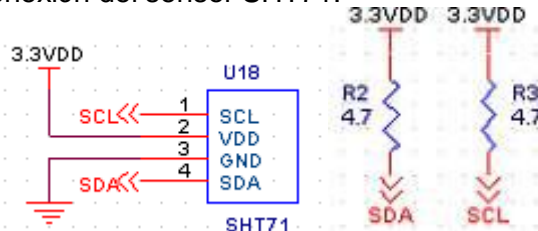


Fuente: Autor

3.5.2 Circuitos sensores

El sensor SHT71 está polarizado con un voltaje de 3.3v, junto con un resistor limitador de corriente y de pull up con valor de 4.7 kΩ entre el pin de VDD y el de Data (SDA), sugerido en la hoja de datos del dispositivo. El circuito de conexión del sensor de la figura 44 muestra los pines los pines de reloj (SCL) y de datos (SDA) que van dirigidos hacia el microcontrolador.

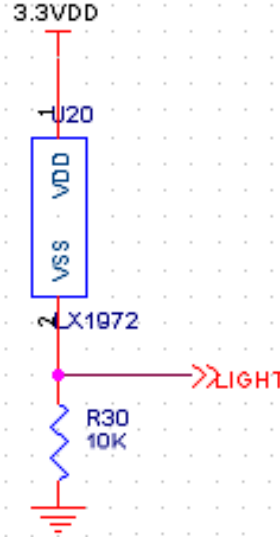
Figura 44. Circuito de conexión del sensor SHT71.



Fuente: Autor

El sensor LX1972 es un fotodiodo y como tal necesita un resistor para limitar su corriente de funcionamiento. El valor de ese resistor es de 10 KΩ, recomendado por la hoja de datos del dispositivo]. La figura 45 describe el circuito de conexión del sensor al microcontrolador a través de la línea 'light'.

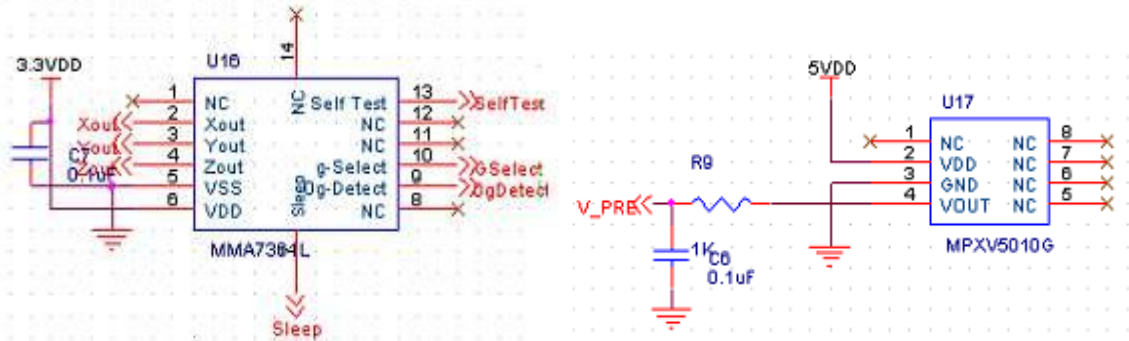
Figura 45. Circuito de conexión del sensor LX1972.



Fuente: Autor

Junto a los sensores comentados anteriormente, se anexaron al diseño del nodo sensor un acelerómetro de tres ejes MMA7361L⁷² y un sensor de presión MPXV5010G⁷³, ambos fabricados por Freescale Semiconductor. La figura 46 ilustra el circuito de conexión del acelerómetro y del sensor de presión. Estos sensores se utilizarán en futuras pruebas para otras aplicaciones.

Figura 46. Circuito de conexión del acelerómetro MMA7361L y del sensor de presión MPXV5010G respectivamente.



Fuente: Autor

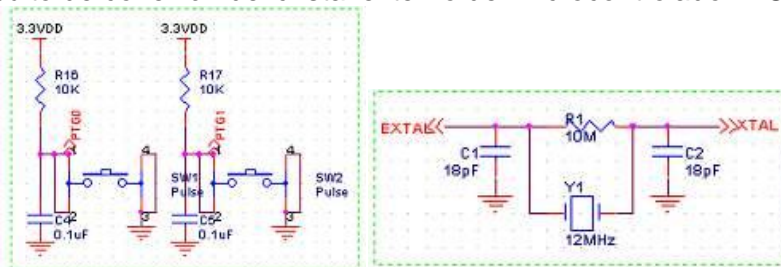
⁷² FREESCALE SEMICONDUCTOR, INC, 2010, MMA7361LC $\pm 1.5g$, $\pm 6g$ Three Axis Low-g Micromachined Accelerometer [online]. 2010. Available from: http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA7361LC.pdf?pspll=1

⁷³ FREESCALE SEMICONDUCTOR, INC, 2007, MPX5100 - MPXV5100 Series Integrated Silicon Pressure Sensor On-Chip Signal Conditioned, Temperature Compensated and Calibrated [online]. 2007. Available from: http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MPX5100.pdf?pspll=1

3.5.3 Circuitos Microcontrolador

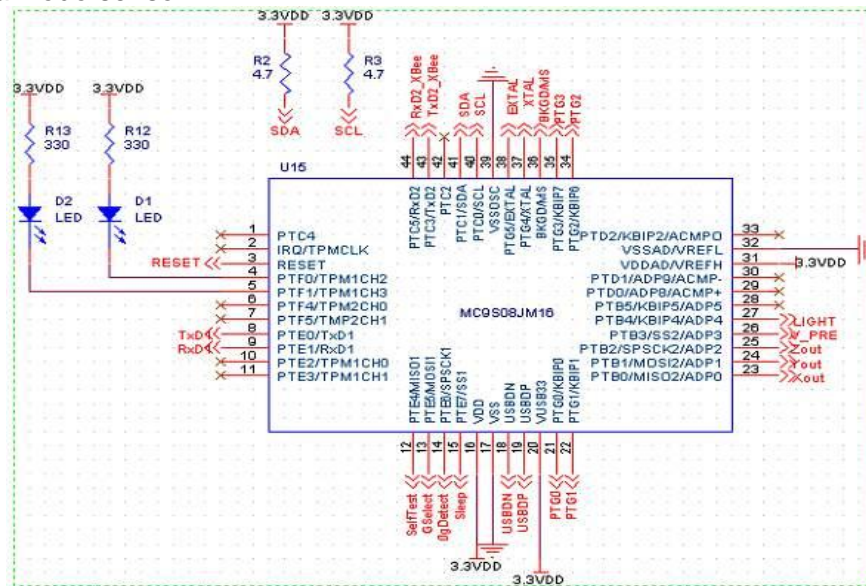
El circuito esquemático de la figura 48 muestra cómo se integra el microcontrolador MC9S08JM16 al nodo sensor. Contiene los pines de alimentación (VDD y VSS), de comunicación con los sensores SHT71 (SCL: PTC0 y SDA: PTC1), LX1972 (ADP4: Light), MMA7361L (Xout: ADP0, Yout: ADP1, Zout: ADP2, Selftest: MISO1, G select: MOSI1, 0gDetect: SPCK1, Sleep: SS1) y MPX5010G (V_PRE ó VOUT: ADP3). Como parte del funcionamiento del microcontrolador se incluyó un cristal cuarzo de 12 MHz que actúa como oscilador externo⁷⁴ [70]. La figura 47 muestra el circuito de conexión del cristal junto con dos pulsadores de propósito general (pines PTG0 y PTG1) para futuros usos.

Figura 47. Circuito de conexión del cristal externo del microcontrolador MC9S08JM16.



Fuente: Autor

Figura 48. Circuito esquemático de conexión del microcontrolador MC9S08JM16 integrado al nodo sensor.

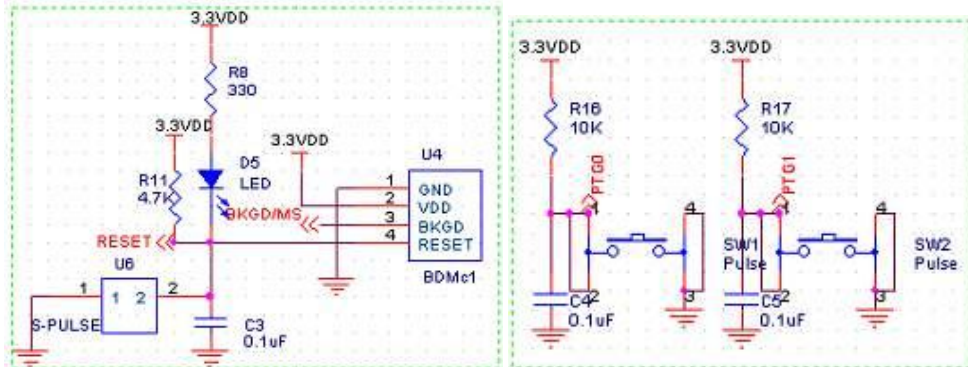


Fuente: Autor

⁷⁴ FREESCALE SEMICONDUCTOR, 2008b, AN3499 Clock Options on the HC9S08 Family. Application Note [online]. 2008. Available from: http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/app_note/AN3499.pdf

El microcontrolador debe ser programado, y para cumplir con esa necesidad se incluyó un circuito de conexión que incluye los pines BKGD y RESET, junto con VDD y GND, siendo compatibles con los pines del conector BDM (Background Debug Mode)⁷⁵. La figura 49 describe el circuito de conexión de los pines del conector BDM personalizado necesarios para programar el microcontrolador, y dos pulsadores de propósito general para implementación con interrupción de teclado KBI (Keyboard Interrupts) para usos futuros.

Figura 49. Circuito esquemático de conexión del conector BDM personalizado y pulsadores de propósito general, respectivamente.

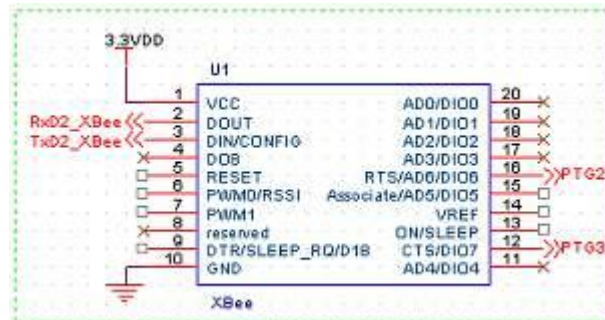


Fuente: Autor

- **Circuito módulo Xbee**

El módulo Xbee se comunica con el microcontrolador a través de los pines 43 y 44 del mismo, denominados TxD2_XBee y RxD2_XBee. Los pines 12 y 16 del módulo Xbee, van dirigidos hacia los pines PTG3 y PTG2 del microcontrolador. Esos pines del microcontrolador son KBIP6 y KBIP7 respectivamente. La figura 50 muestra el circuito esquemático de conexión del módulo Xbee.

Figura 50. Circuito de conexión del módulo Xbee del nodo sensor.



Fuente: Autor

⁷⁵ FREESCALE SEMICONDUCTOR, 2006, *Introduction to HCS08 Background Debug Mode. AN3335 Application Note* [online]. 2006. Available from: http://www.freescale.com/files/microcontrollers/doc/app_note/AN3335.pdf

3.6 DISEÑO DE PCB

Luego de describir los circuitos esquemáticos que componen los módulos del nodo sensor, se debe dar paso a lo referente al diseño de la tarjeta de circuito impreso o PCB (Printed Circuit Board) del nodo sensor.

La tarjeta de circuito impreso fue fabricada con dos capas en material FR4 en 1,6 mm, el cual está formado por varias hojas de prepag, constituido por capas tejidas de fibra de vidrio impregnadas con resina epoxi⁷⁶. Los componentes electrónicos usados fueron ensamblados con tecnología de montaje superficial SMT (Surface Mount Technology) para miniaturizar los prototipos, siendo es el método para reducir tamaño de tarjetas más usado actualmente, se usa tanto para componentes activos como pasivos. Los componentes para montaje superficial se conocen como dispositivos de montaje superficial SMD (Surface Mount Device)⁷⁷. Los tamaños de componentes de montaje superficial más comunes se muestran en la tabla 16, en el desarrollo se tuvo la premisa de usar SMD-402 y SMD-603 con el fin de garantizar un tamaño reducido en el diseño del circuito impreso⁷⁸.

Tabla 16. Medidas de componentes de montaje superficial SMD

	Tamaño	Dimensiones: mm				
		L	W	T	e Min.	g Min.
	SMD_402	1.0±0.05	0.5+0.05	0.5±0.05	0.15 a 0.35	0.3
	SMD_603	1.6±0.1	0.8±0.1	0.8±0.1	0.2 a 0.5	0.5
	SMD_805	2.0±0.1	1.25±0.1	0.85±0.1	0.2 a 0.7	0.7
	SMD_1206	3.2±0.15	1.6±0.15	0.85±0.1	0.3 a 0.8	1.5

Fuente: (Alfonso Sánchez 2009)

Después de realizar el footprint o huella de los dispositivos (módulo xbee, y demás circuitos integrados) se realizó el enrutamiento de señales de alimentación y periféricos teniendo en cuenta algunas consideraciones en el grosor de pistas, según su función. La consideración más importante es dada por el fabricante del PCB, indicando el grosor de

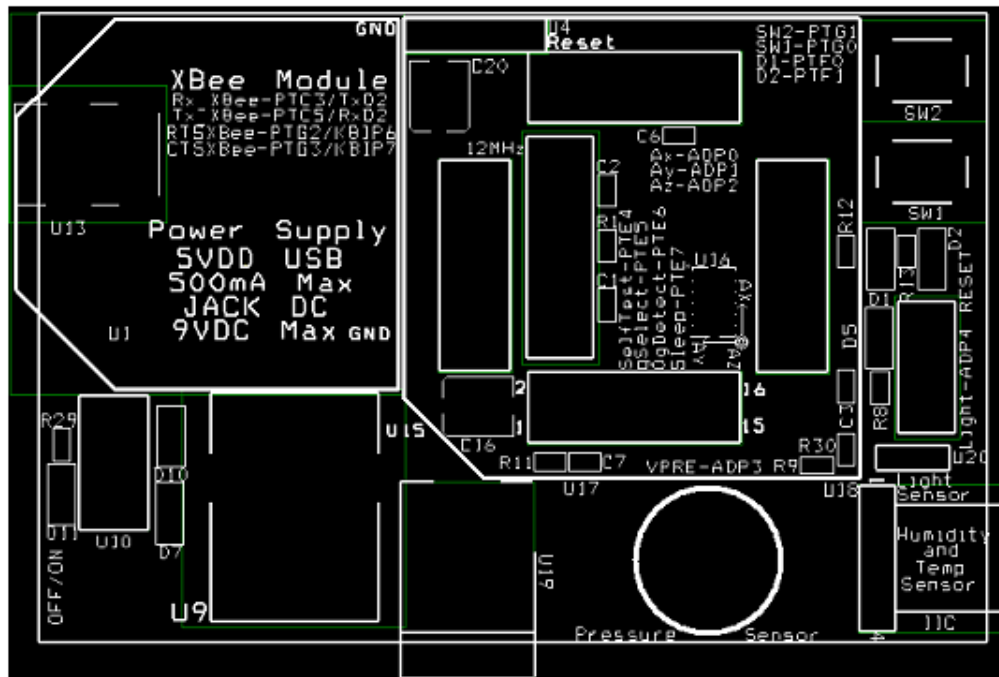
⁷⁶ MITZNER, Kraig, 2009, *Complete PCB design using OrCAD Capture and PCB editor*. Oxford, United Kingdom : Newnes by Elsevier Inc

⁷⁷ BURR BROWN PRODUCTS FROM TEXAS INSTRUMENTS, 2003, *SOLDER PAD RECOMMENDATIONS FOR SURFACE-MOUNT DEVICES* [online]. 2003. Available from: <http://www.ti.com/lit/an/sbfa015a/sbfa015a.pdf>

⁷⁸ ALFONSO SÁNCHEZ, Manuel Ricardo, 2009, *Diseño y evaluación de una red de nodos zigbee. Trabajo de grado*. Bogotá D.C : Escuela Colombiana de Carreras Industriales ECCI. Facultad de Ingeniería Electrónica.

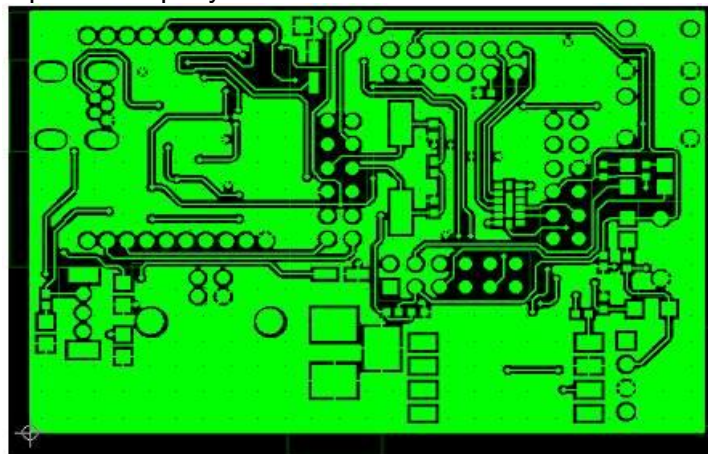
0.203 mm. Lo cual es lo recomendado para circuitos de montaje superficial según microcircuitos S.A, empresa elegida para la fabricación de los circuitos impresos PCB (Printed Circuit Board). Finalmente, se tienen los layouts, que se diseñaron con el software *OrCAD Layout 6.1*. La capa de serigrafía, que es la capa que muestra la información sobre la ubicación y tamaño de los componentes (en color blanco), la capa superior o top layer (denominada de componentes) y la capa inferior o bottom layer (denominada de cobre o soldadura porque es la capa mínima para realizar el diseño) se muestran en las figuras 51, 52, 53 y 54 respectivamente.

Figura 51. Capa de serigrafía de información de conexiones de la PCB.



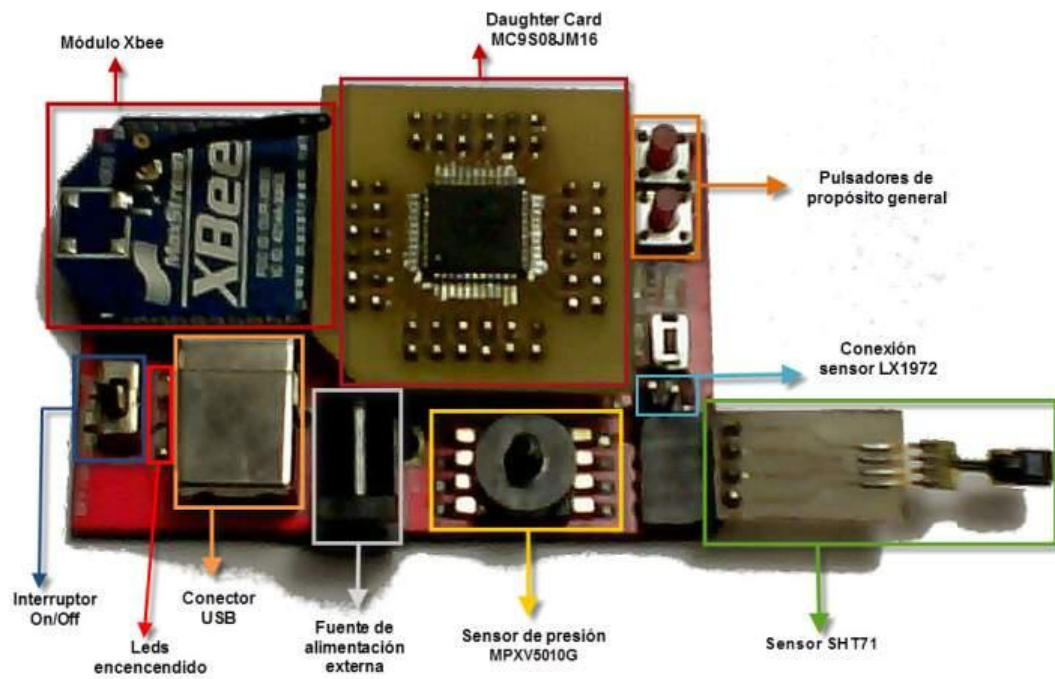
Fuente: Autor

Figura 52. Capa superior o top layer.



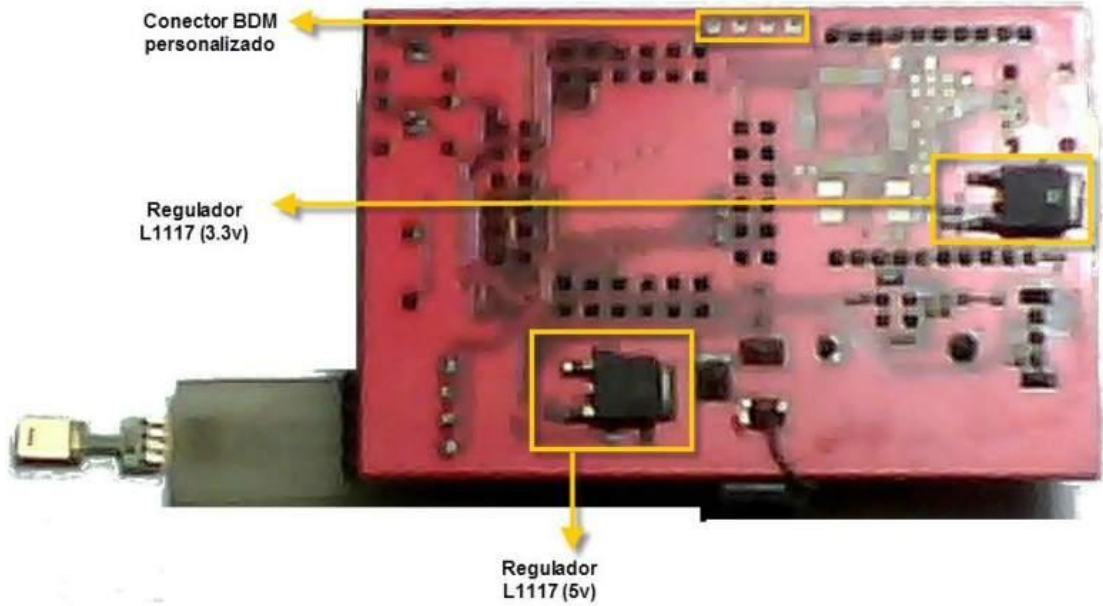
Fuente: Autor

Figura 55. Descripción de los componentes de la capa superior del nodo sensor.



Fuente: Autor

Figura 56. Descripción de los componentes de la capa inferior.



Fuente: Autor

4.1 MÓDULO DE PROCESAMIENTO

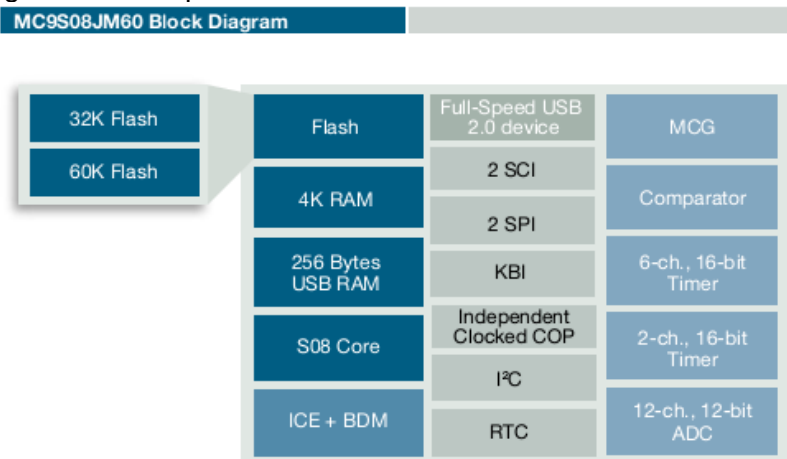
Para el coordinador, al igual que en el nodo sensor, se seleccionó un microcontrolador HCS08 de Freescale Semiconductor, más específicamente MCS08JM60. A continuación se describen algunas de sus características.

4.1.1 Microcontrolador MC9S08JM60

El microcontrolador MC9S08JM60 es un microcontrolador de 8 bits de bajo costo y bajo consumo de energía. Algunas características (ver figura 58) de este microcontrolador son⁷⁹:

- Velocidad de oscilador máxima de 48MHz con bus interno de 24MHz.
- Puerto USB Full-Speed 2.0 con regulador de 3.3v interno y 256 Bytes memoria RAM dedicada al USB.
- 16KB de memoria Flash, 1KB de memoria RAM.
- 8 canales ADC de 12 bits.
- Comparador análogo.
- Módulos SCI para comunicación RS232, con full-duplex NRZ.
- 1 Modulo SPI con full-duplex.
- Modulo I2C, que puede alcanzar una tasa de 100 kbps.
- 1 temporizador de 2 canales y 1 temporizador de 4 canales con resolución de 16bits.
- 6 Canales PWM
- 1 temporizador RTC con modo de conteo seleccionable binario o en décadas.
- 37 pines E/S de propósito general, 7 interrupciones por teclado, y 8 bits de E/S rápidos de propósito general conectado al bus local de la CPU de alta velocidad.

Figura 58. Diagrama de bloques del microcontrolador MC9S08JM60.



Fuente (Freescale Semiconductor 2008)

El microcontrolador MC9S08JM60 es parte de la familia JM, que se caracteriza por su bajo costo, bajo consumo de potencia y alto desempeño, además junto con las familias

⁷⁹ FREESCALE SEMICONDUCTOR, *8-bit S08 embedded controllers. MC9S08JM16 Fact Sheet* [online]. 2008. Available from: http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/fact_sheet/MC9S08JM16FS.pdf?fsp=1

QE y AC forman parte de la serie *flexis*, la cual ofrece microcontroladores de 8 y 32 bits compatibles en pines periféricos y herramientas, todo esto enmarcado en la estrategia llamada Controller Continuum⁸⁰. Esto significa que las aplicaciones desarrolladas para el microcontrolador de 8 bits MC9S08JM60 pueden ser totalmente migradas al microcontrolador de 32 bits MCF51JM128 con el fin de agregar mayor velocidad y desempeño. En el caso de este proyecto representa una ventaja si se quiere adicionar muchos nodos a la red.

4.2 MÓDULO DE ALIMENTACIÓN

En el caso del concentrador, la fuente de energía únicamente proviene del puerto USB del PC mediante un conector tipo B.

4.3 MÓDULO DE DATA LOGGER

Un data logger o registrador de datos puede ser utilizado en situaciones remotas. Permite almacenar los datos capturados por los sensores en el modo de comunicación on-line, y tener un historial de los datos registrados que se pueden leer por separado sin el dispositivo real que se presenta.

Las lecturas se almacenan en una memoria SD y se descargan fácilmente en el PC a través de una memoria micro USB para ser leídas

Este módulo incluye una LCD, y cinco pulsadores o botones para seleccionar las variables físicas a visualizar y almacenar.

4.4 MÓDULO DE COMUNICACIÓN USB

Para comunicar el coordinador con el PC, se usó el puerto USB (dado que actualmente es el de mayor presencia en la mayoría de computadores y el puerto serial ha entrado en desuso) haciendo una interfaz entre la UART (pines Tx y Rx) del módulo xbee y del microcontrolador MC9S08JM60. Para ello se utilizó el chip FT2232D de FTDI⁸¹, que es un puente USB a UART (USB to UART bridge) compatible con USB 2.0 de velocidad alta (Full Speed). El FT2232D, de FTDI, resuelve toda la comunicación en el bus USB, presentándose al usuario como un puerto serie asíncrono virtual (Virtual COM port) de fácil uso e instalación dinámica plug-and-play.

El FT2232D, dispone de dos controladores de propósito general (UART o FIFO) en un mismo chip, de forma que se pueden obtener dos canales de E/S de un único puerto USB, sin necesidad de usar hub alguno. Además de la posibilidad de configurar cada

⁸⁰ CASADO, Luis, *Nueva familia de microcontroladores de 8 y 32 Bits FLEXIS de Freescale* [online]. 2007. Available from: <http://www.bairesrobotics.com.ar/data/flexis.pdf>

⁸¹ FUTURE TECHNOLOGY DEVICES INTERNATIONAL LTD, 2010, *FT2232D DUAL USB TO SERIAL UART/FIFO IC Datasheet* [online]. 2010. Available from: http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT2232D.pdf

canal como interfaz UART o interfaz FIFO, existen diversas variantes de estos modos de comunicación, como el denominado Bit-Bang Mode (asíncrono y síncrono), el MPSSE (Multi-Protocol Serial Engine Interface), el modo de MCU Host Bus Emulation o el Fast Opto-Isolated Serial Interface⁸².

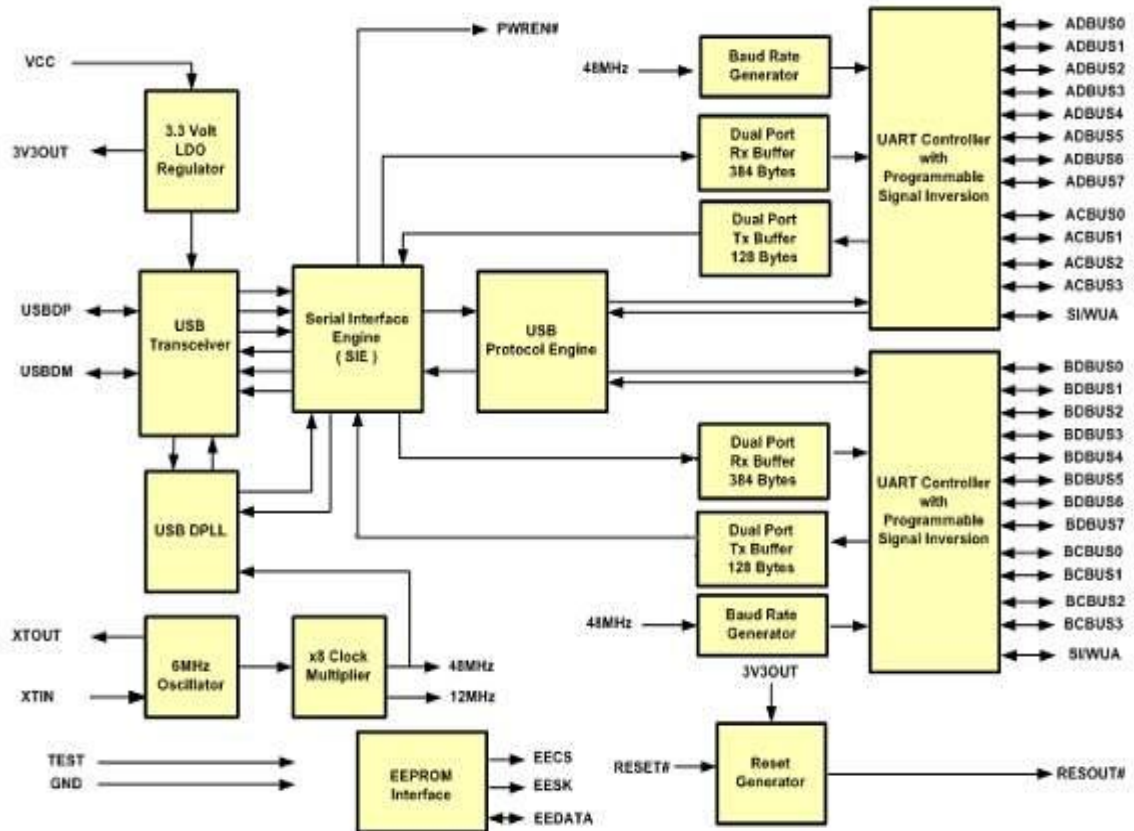
El FT2232D satisface las necesidades de comunicación del coordinador con el PC para enviar la información a una interfaz gráfica de usuario (GUI), y hacer ajustes al módulo Xbee por medio del software y firmware puestos a disposición por Digi en la web.

Internamente, se aprecian varios módulos funcionales, entre los que sobresalen:

- Controlador UART / FIFO de propósito general: Se encargan de gestionar las transferencias entre los búferes TX y RX y los registros de transmisión y de recepción UART / FIFO. Existe uno por cada canal.
- Búfer de Transmisión TX: Los datos que vienen desde el puerto USB se guardan en este búfer de 128 bytes antes de ser enviados al registro de transmisión del Controlador UART / FIFO. Existe uno por cada canal.
- Búfer de Recepción RX: Los datos que vienen desde el registro de recepción del Controlador UART / FIFO, se almacenan en este búfer de 384 bytes antes de ser enviados hacia el puerto USB en una petición de datos desde el host. Existe uno por cada canal.
- SIE (Serial Interface Engine): Es un conversor serie-paralelo y paralelo-serie de los datos que vienen del enlace USB, siguiendo la especificación del protocolo USB 2.0 (genera o elimina bits de relleno, añade o chequea códigos de control de errores, etc.)
- Oscilador de 6 MHz: Este módulo genera una señal de reloj de referencia de 6 MHz a partir de un cristal o resonador cerámico de 6 MHz externo al chip.
- Multiplicador de Reloj x8: La señal obtenida (a partir de oscilador de 6MHz) se hace pasar además por un multiplicador, consiguiendo así un reloj de 48 MHz para ser utilizado en otros bloques, como el generador de tasa de baudios para el modo UART o el módulo DPPL USB encargado de separar reloj y datos de la señal codificada en NRZI que viene del puerto USB.
- Interfaz EEPROM: Constituye una interfaz de tres pines con un memoria EEPROM externa de clase 93C46 (64 x 16 bit), 93C56 (128 x 16 bit) ó 93C66 (256 x 16 bit), que servirá para guardar datos de configuración del dispositivo y establecer el modo de comunicación.

⁸²ARELLANO MAULEÓN, Francisco Javier; CALDERÓN SETIÉN, Francisco; SOMOVILLA DE LA TORRE, Sergio. Diseño y fabricación de una placa didáctica basada en FPGA. 2006.

Figura 59. Diagrama de bloques del FT2232D



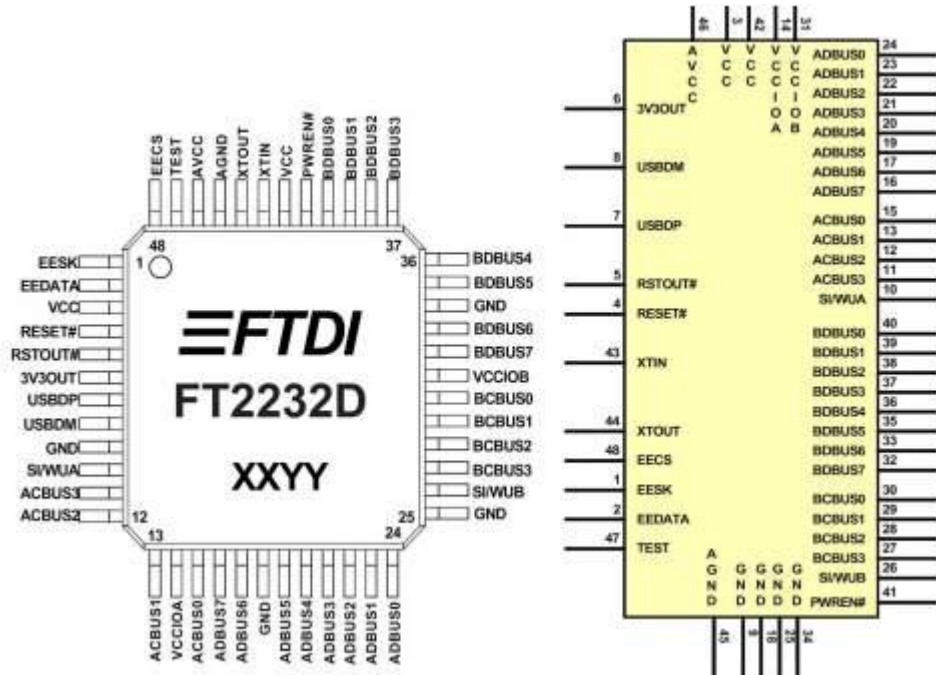
Fuente: (Future Technology Devices International Ltd 2010)

▪ Distribución de pines

El dispositivo se encuentra disponible en encapsulados del tipo LQFP (Low Profile Quad Flat Pack) de 48 pines, que se pueden clasificar en los siguientes grupos:

- Interfaz E/S: 26 pines, 13 por cada canal.
- Interfaz eléctrica: 11 pines.
- Interfaz con el USB: 2 pines.
- Interfaz con la EEPROM: 3 pines.
- Interfaz con el oscilador externo: 2 pines.
- Señales de reseteo del dispositivo: 2 pines.
- Señal de modo suspendido (USB suspend): 1 pin.
- Señal de test: 1 pin.

Figura 60. Pines del encapsulado LQFP y esquemático del FT2232D



Los 11 pines de la interfaz eléctrica son:

Tabla 18. Pines de la interfaz eléctrica

# Pin	Señal	Tipo	Descripción
3, 42	VCC	Potencia	Voltaje de alimentación (entre 4.35 V y 5.25 V). Alimenta el núcleo del chip, el regulador interno de nivel y los pines que no son de los Controladores UART / FIFO.
9, 18, 25, 34	GND	Potencia	Tierra.
14	VCCIOA	Potencia	Voltaje de alimentación (entre 3.0 V y 5.25 V) de los pines de E/S del canal A. Alimenta el Controlador UART / FIFO A.
31	VCCIOB	Potencia	Voltaje de alimentación (entre 3.0 V y 5.25 V) de los pines de E/S del canal B. Alimenta el Controlador UART / FIFO B.
6	3V3OUT	Salida	Salida de 3.3 V del regulador interno de nivel.
46	AVCC	Potencia	Alimentación analógica para el multiplicador de la frecuencia de reloj interna.
45	AGND	Potencia	Tierra analógica para el multiplicador de la frecuencia de reloj interna.

Fuente: (Arellano Mauleón, Calderón Setién, Somovilla de la Torre 2006)

La interfaz con el USB está constituida por dos pines:

Tabla 19. Pines de la interfaz USB.

# Pin	Señal	Tipo	Descripción
7	USBDP	Entrada/Salida	Señal de datos del USB (positiva)
8	USBDM	Entrada/Salida	Señal de datos del USB (negativa)

Fuente: (Arellano Mauleón, Calderón Setién, Somovilla de la Torre 2006)

La interfaz del oscilador externo de 6 MHz, los pines de test, de modo suspendido y de reset se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 20. Pines del oscilador externo de 6 MHz, de test, modo suspendido y de reset.

# Pin	Señal	Tipo	Descripción
43	XTIN	Entrada	Entrada al módulo del oscilador de 6 MHz.
44	XTOUT	Salida	Salida al módulo del oscilador de 6 MHz.
4	RESET#	Entrada	Permite el reseteo del chip desde el exterior.
5	RSTOUT#	Salida	Salida del generador de reset interno.
41	PWREN#	Salida	Si está en alta, indica que el chip está en modo suspendido.
47	TEST	Entrada	Sitúa al dispositivo en el modo de testeo.

Fuente: (Arellano Mauleón, Calderón Setién, Somovilla de la Torre 2006)

La interfaz con la EEPROM está constituida por 3 pines:

Tabla 21. Pines de la interfaz con la EEPROM

# Pin	Señal	Tipo	Descripción
1	EESK	Salida	Señal del reloj a la EEPROM.
2	EEDATA	Entrada/Salida	Datos hacia y desde la EEPROM.
48	EECS	Entrada/Salida	Chip Select de la EEPROM.

Fuente: (Arellano Mauleón, Calderón Setián, Somovilla de la Torre 2006)

4.5 DISEÑO DE LOS CIRCUITOS DEL COORDINADOR

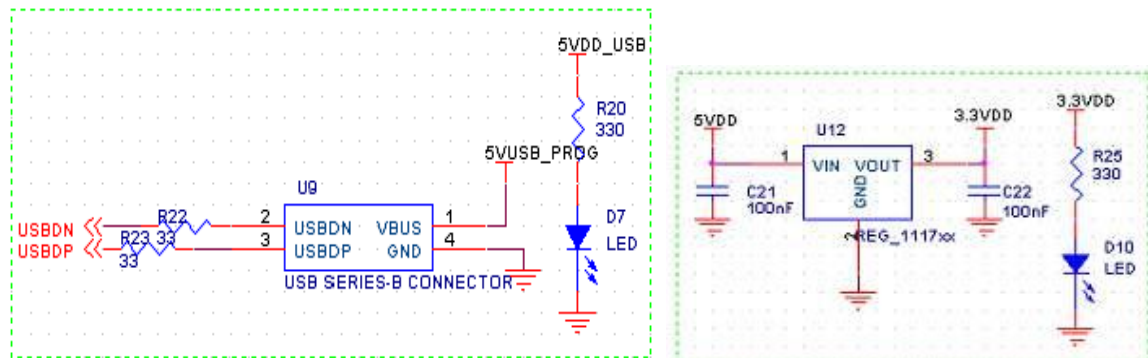
A continuación se presenta una compilación de los circuitos esquemáticos diseñados, que ilustran el funcionamiento de de los diferentes dispositivos que conforman el coordinador.

4.5.1 Circuitos de alimentación

El coordinador a diferencia del nodo sensor únicamente es energizado por medio de una conexión USB tipo B. El conector USB tipo B provee al nodo sensor de un voltaje de 5v proveniente desde el otro extremo por medio de un conector USB tipo A conectado al PC. Este voltaje reducido a un nivel de 3.3v por un regulador L1117 con encapsulado SOT-223 [67] configurado para trabajar a ese nivel.

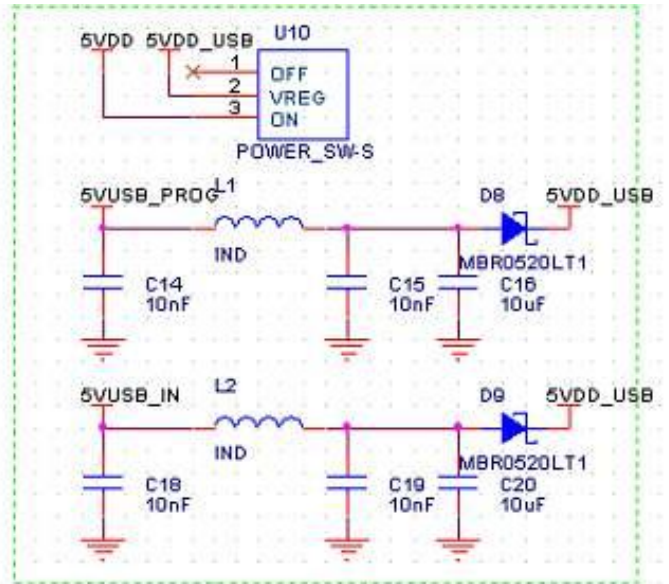
Un led actúa como indicador de conexión y suministro del voltaje regulado de 5v, voltaje necesario para alimentar la LCD, buzzer o zumbador y parte del FT2232. El regulador de voltaje con salida de 3.3v es necesario para alimentar al módulo Xbee, al FT2232D, igual que el microcontrolador MC9S08JM16. La figura 61 muestra el circuito de conexión de conector USB tipo B y el regulador L1117. En la figura 61 se muestra el circuito de encendido a través de un interruptor de posición (On/Off) para el conector USB tipo B, dónde la corriente es limitada por un diodo Schottky MBR0520LT1.

Figura 61. Circuito de alimentación por medio del conector USB serie B y regulación a 3.3v.



Fuente: Autor

Figura 62. Interruptor de encendido para seleccionar el voltaje del conector USB serie B.



Fuente: Autor

4.5.2 Circuitos comunicación USB

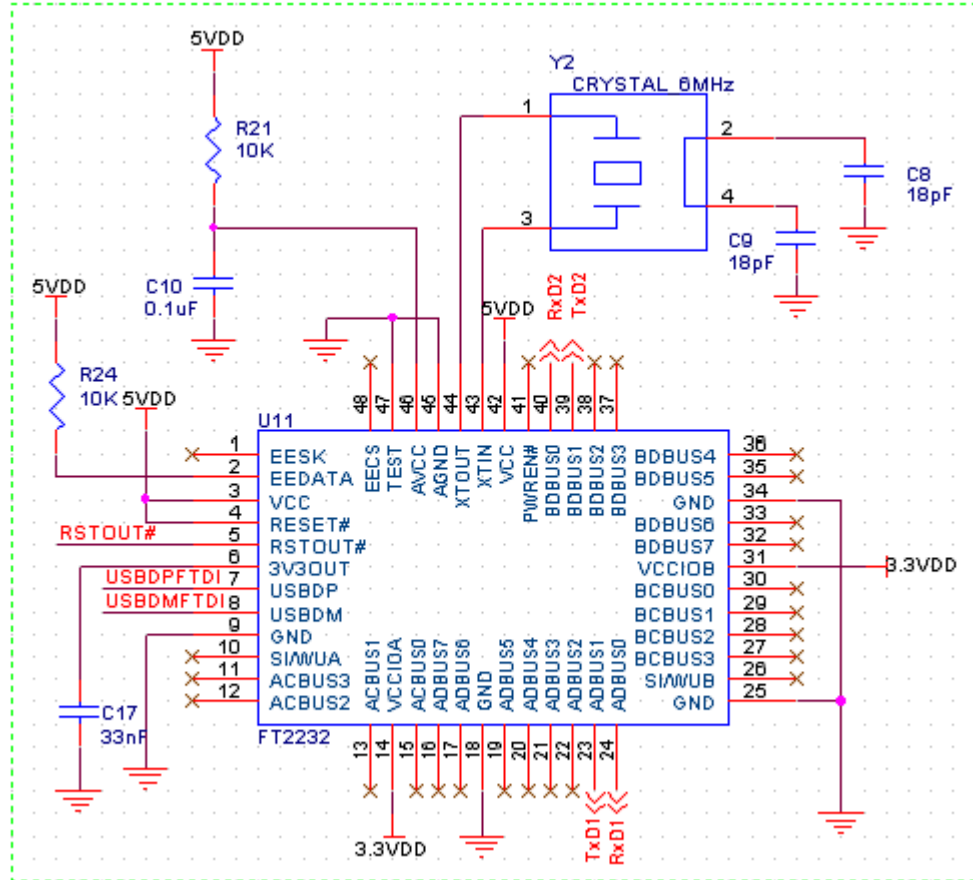
La figura 63 muestra el circuito que puede servir como puerto COM virtual. El controlador USB FT2232D se interconecta al microcontrolador MC9S08JM60. La salida serial asíncrona (TxD1) del microcontrolador se conecta a la entrada serial asíncrona (RX1:ADBUS0) del FT2232D, y la salida serial asíncrona (TXD: ADBUS1) del FT2232D se conecta a la entrada serial asíncrona (RxD1) del microcontrolador.

La salida serial asíncrona (TxD2) del módulo Xbee se conecta a la entrada serial asíncrona (RX2: BDU50) del FT2232D, y la salida serial asíncrona (TXD: ADBUS1) del FT2232D se conecta a la entrada serial asíncrona (RxD2) del módulo Xbee.

El chip FT2232D está polarizado a 5v (pines: VCC, RESET#, EEDATA, y AVCC) y a 3.3v (pines: VCCIOA, VCCIOB). Como oscilador externo, un cristal de 6 MHz se conectó entre los pines XTIN y XTOUT (43 y 44) y tierra (GND), con dos condensadores de desacople con valor de 18 pF.

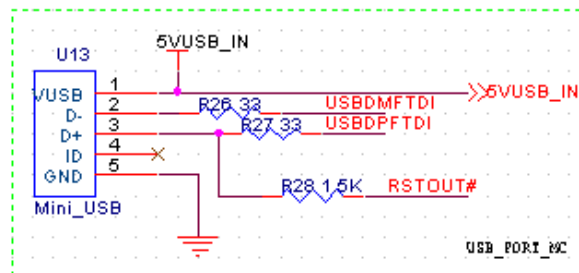
Los pines D+ y D- del conector USB están conectados a USBDP, USBDM y RSTOUT# (ver figura 64). Un resistor de pull-up de 1.5 KΩ se conectó entre USBDP y RSTOUT# a estos últimos como parte de la conexión de alimentación del bus USB. Las conexiones se hicieron siguiendo las recomendaciones descritas en la hoja de datos del chip.

Figura 63. Circuito esquemático del FT2232D para generar virtual com.



Fuente: Autor

Figura 64. Conexión de los pines USBDM, USBDP y RSTOUT# al conector miniusb.



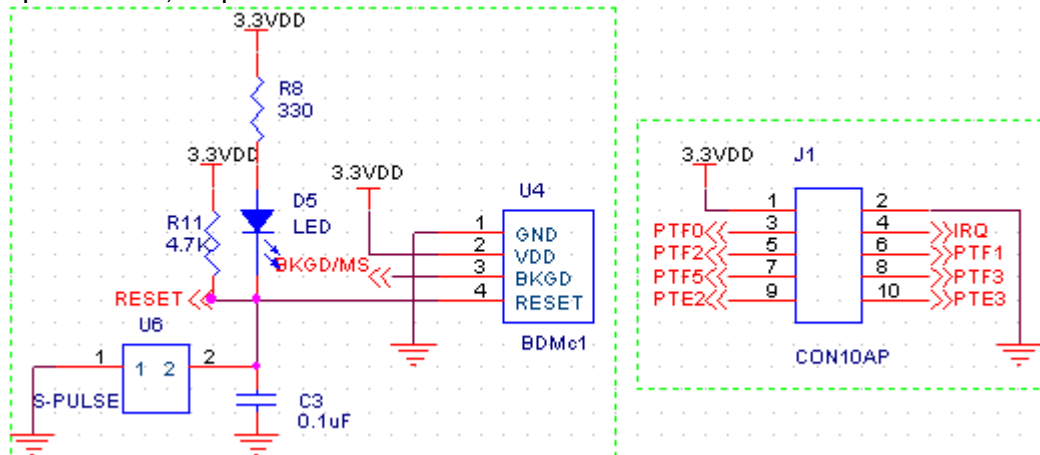
Fuente: Autor

4.5.3 Circuitos Microcontrolador

El circuito esquemático de la figura 65 muestra cómo se integra el microcontrolador MC9S08JM16 al coordinador. Contiene los pines de alimentación (VDD y VSS), de comunicación con el sensor: MMA7361L (Xout: ADP0, Yout: ADP1, Zout: ADP2, Selftest: ADP5, G select: ADP3, 0gDetect: ADP4, Sleep: PTC6).

La figura 67 describe el circuito de conexión de los pines del conector BDM [71] personalizado necesarios para programar el microcontrolador (BKGD, RESET, VDD y GND), y un conector de expansión (J1) para ser usado en aplicaciones que requieran usar el TPM (Timer/PWM) del microcontrolador.

Figura 67 Circuito esquemático de conexión del conector BDM personalizado y conector de expansión J1, respectivamente.

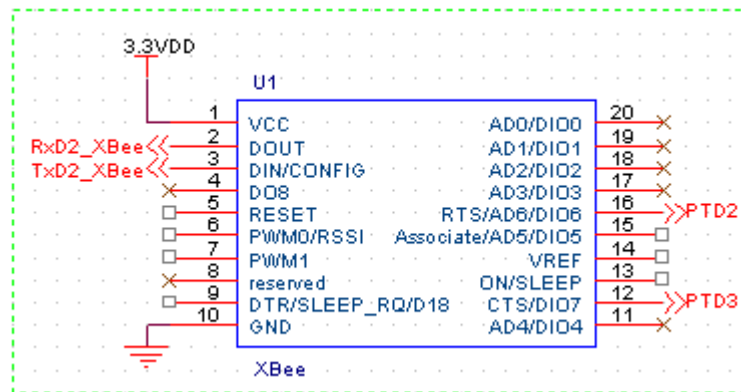


Fuente: Autor

4.5.4 Circuito módulo Xbee

El módulo Xbee se comunica con el microcontrolador a través de los pines 63 y 64 del mismo, denominados TxD2_Xbee y RxD2_XBee. Los pines 12 y 16 del módulo Xbee, van dirigidos hacia los pines PTD3 y PTD2 del microcontrolador. Esos pines del microcontrolador son KBIP3 y KBIP2 respectivamente. La figura 68 muestra el circuito esquemático de conexión del módulo Xbee.

Figura 68. Circuito de conexión del módulo Xbee al coordinador.

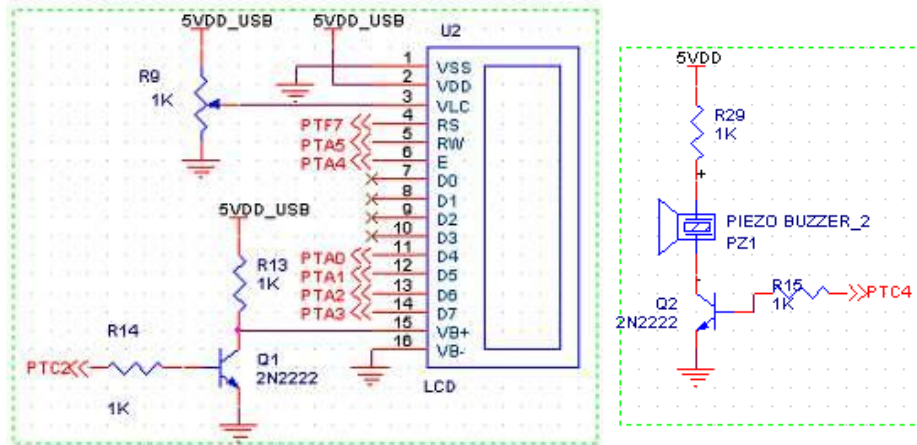


Fuente: Autor

4.5.5 Circuitos Data Logger

Con el fin de mostrar los resultados de las lecturas de los sensores, una pantalla de cristal líquido (LCD) se añadió al coordinador. Las LCD vienen en formas diferentes, colores y tamaños. Uno de los más comunes es 16x2 (16 caracteres por 2 líneas). La LCD dispone de 16 pines de conexión. Los primeros catorce pines se utilizan para controlar la pantalla y los dos últimos están reservados para la iluminación de fondo. La figura 69 muestra el circuito esquemático necesario para conectar una pantalla de 16 * 2 LCD al microcontrolador para mostrar un texto. Un potenciómetro 1 kΩ se utilizó para controlar el brillo de los caracteres en la pantalla. La energía de la LCD se obtiene de la salida de 5 V del conector USB del PC.

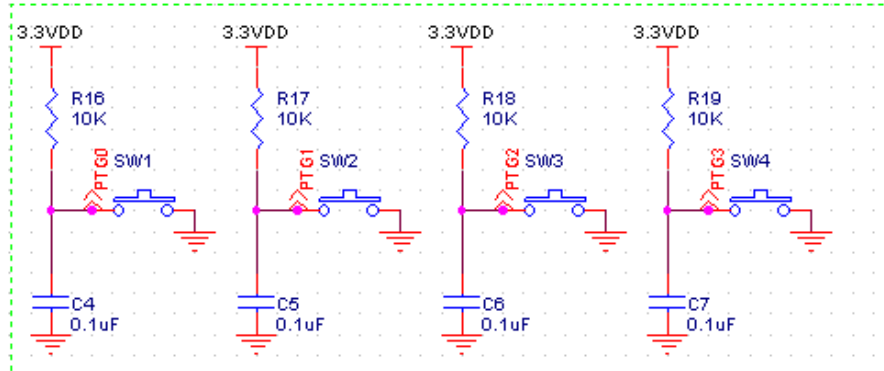
Figura 69. Conexión de la LCD y el zumbador al microcontrolador.



Fuente: Autor

Como parte del data logger se añadió un zumbador (buzzer) de manera de señalización cuándo se oprima cada uno de los pulsadores (ver figura 70) para escoger la variable a mostrar en la LCD. Para ello, un transistor NPN 2N2222 trabajando en las regiones de corte y saturación se conectó para activar el zumbador.

Figura 70. Circuito de conexión de los pulsadores del data logger.

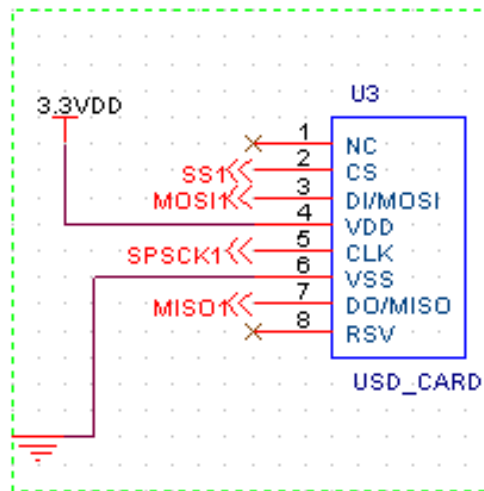


Fuente: Autor

Las tarjetas SD son uno de los más populares basados en dispositivos flash de almacenamiento extraíbles. El bajo costo, tamaño pequeño, bajo consumo de energía y hacen de la tarjeta SD el dispositivo para el almacenamiento preferido en el mercado de consumo⁸³.

Una de las maneras de conectar la tarjeta SD, y la más utilizada, es mediante el módulo SPI (Serial Peripheral Interface). La figura 71 muestra la conexión de la tarjeta SD al módulo SCI del microcontrolador MC9S08JM60.

Figura 71. Conexión de la tarjeta SD al módulo SPI del microcontrolador.



Fuente: Autor

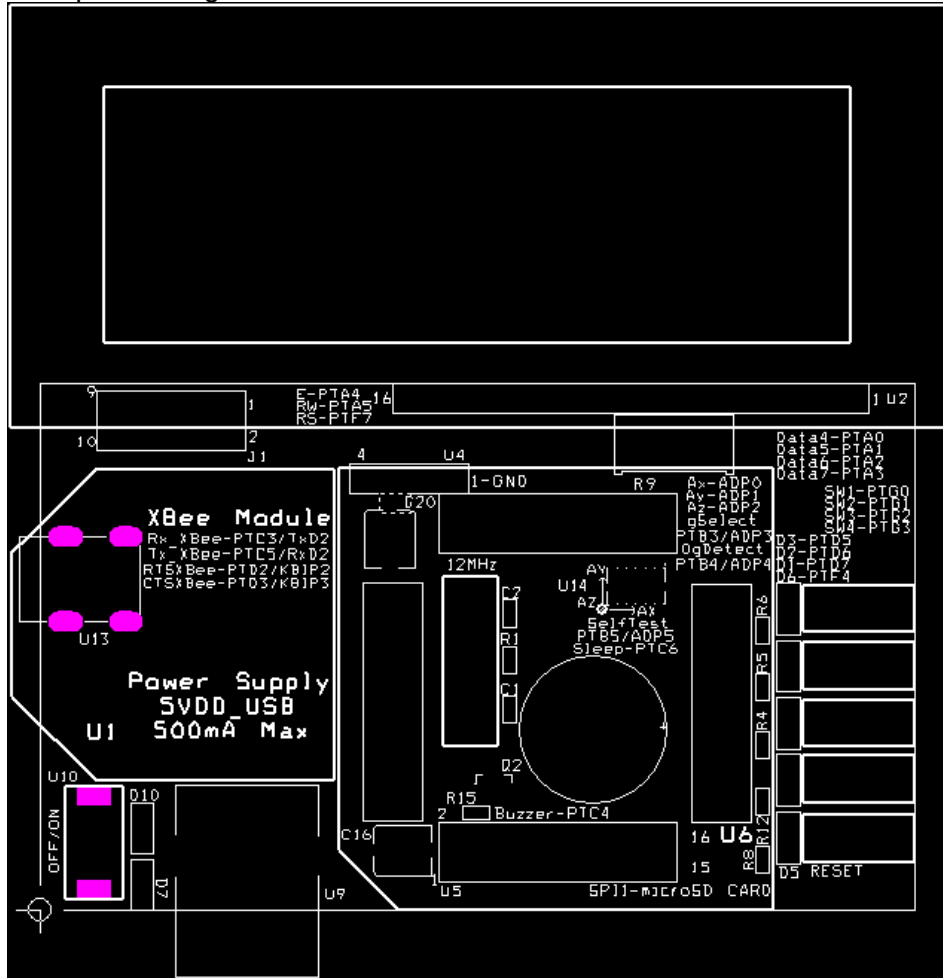
4.6 DISEÑO DE PCB

Antes de discutir sobre los diseños y construcción del PCB, es necesario hacer una compilación de circuitos esquemáticos diseñados, que ilustran el funcionamiento de de los diferentes dispositivos que conforman el coordinador. La PCB del coordinador fue fabricada siguiendo los materiales y métodos de la PCB del nodo sensor.

La capa de serigrafía, que es la capa que muestra la información sobre la ubicación y tamaño de los componentes (en color blanco), la capa superior o top layer (denominada de componentes) y la capa inferior o bottom layer (denominada de cobre o soldadura porque es la capa mínima para realizar el diseño) se muestran en las figuras 72, 73, 74 y 75.

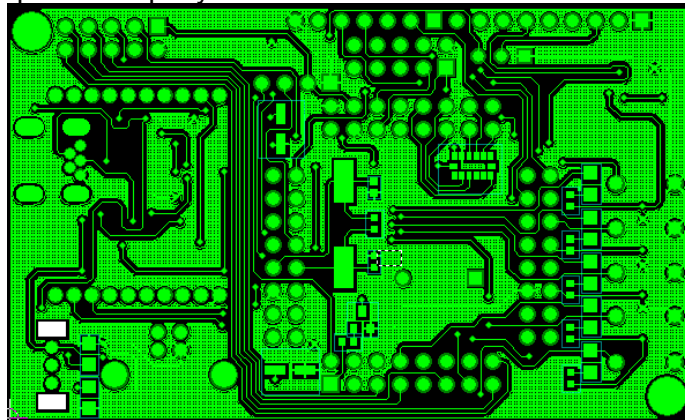
⁸³ FREESCALE SEMICONDUCTOR, 2008c, *DRM104: SD Card Reader Using the M9S08JM60 Series. Designer Reference Manual* [online]. 2008. Available from: http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/ref_manual/DRM104.pdf?fsrch=1&sr=3

Figura 72. Capa de serigrafía de información de conexiones de la PCB.



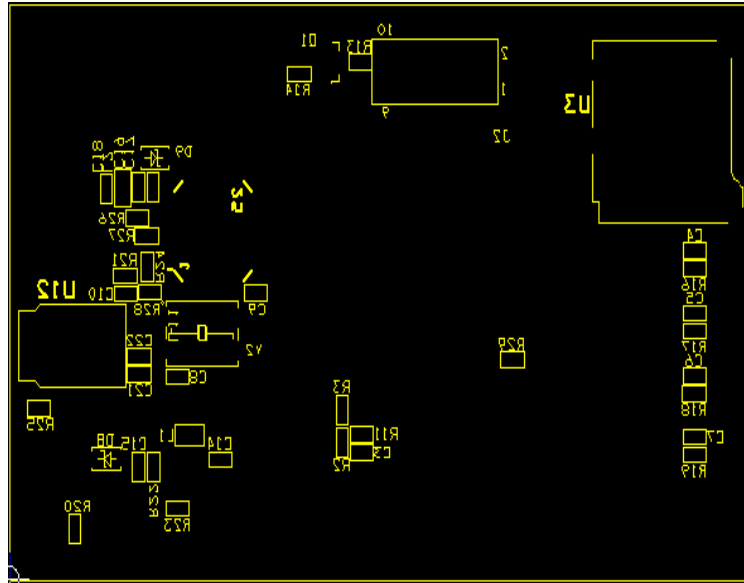
Fuente: Autor

Figura 73. Capa superior o top layer.



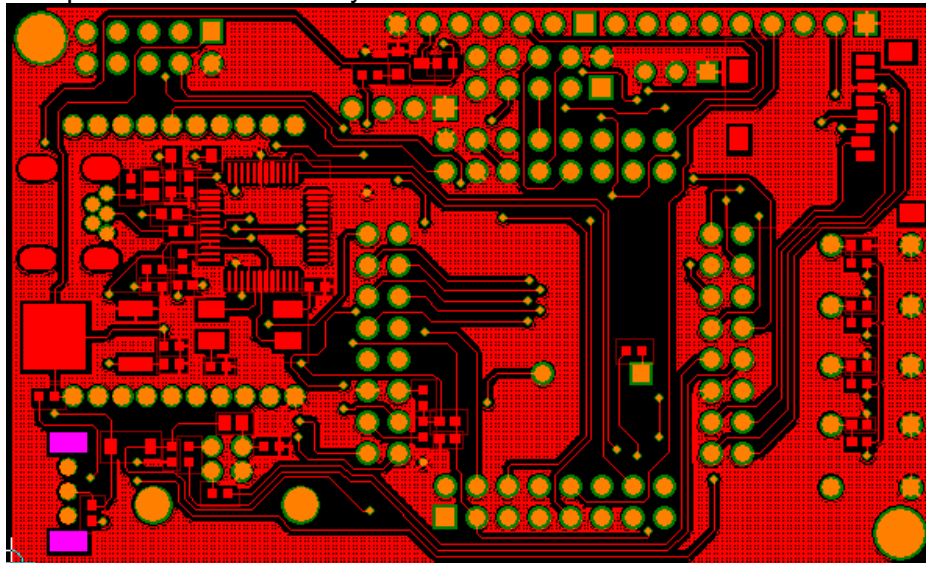
Fuente: Autor

Figura 74. Serigrafía de la capa inferior o bottom layer.



Fuente: Autor

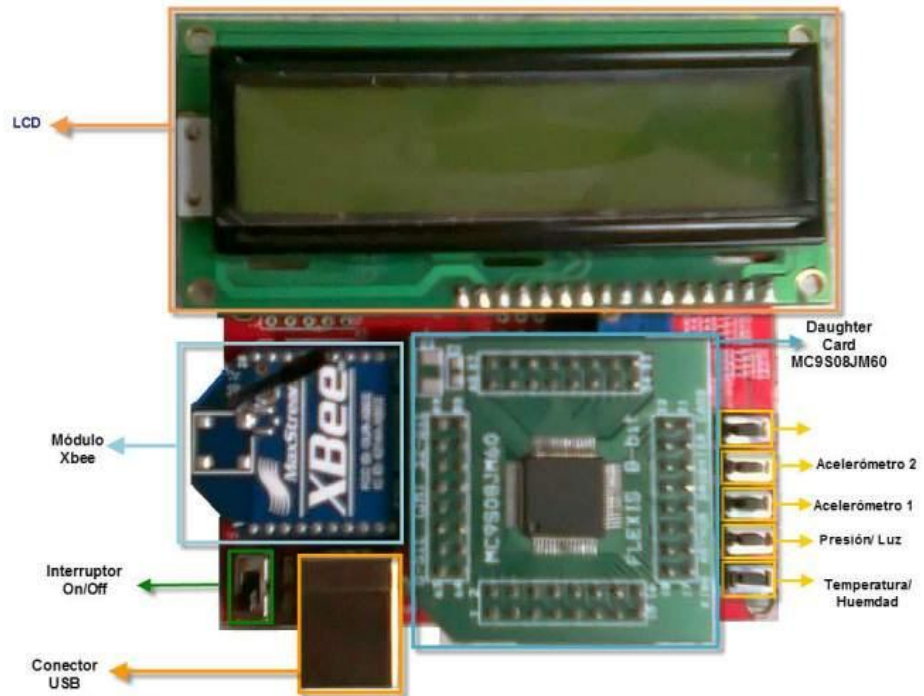
Figura 75. Capa inferior o bottom layer.



Fuente: Autor

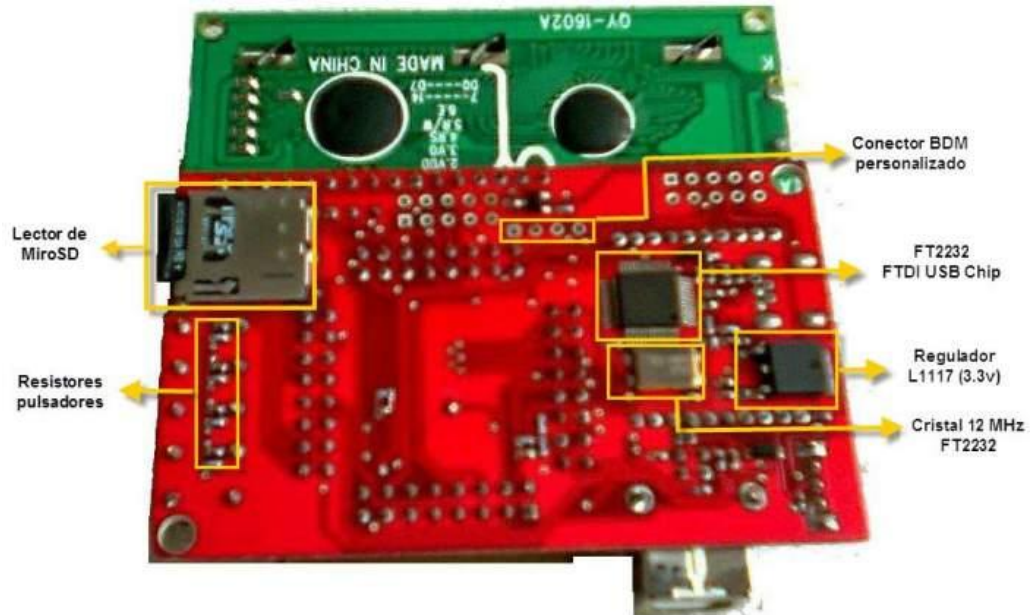
La board ensamblada con todos sus componentes soldados, dentro de los cuales se destacan: conector USB, pulsadores, leds, conector BDM personalizado, LCD, módulo Xbee, lector de micro SD, etc., se muestra en las figuras 76 y 77.

Figura 76. Descripción de los componentes de la capa superior del coordinador.



Fuente: Autor

Figura 77. Descripción de los componentes de la capa inferior.



Fuente: Autor

5. COMUNICACIÓN ENTRE DISPOSITIVOS

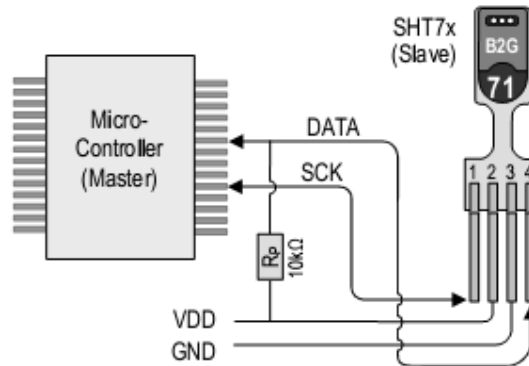
5.1 SENSOR SHT71

La comunicación del sensor SHT71 con el microcontrolador MC9S08JM16 se hizo a través del módulo I²C. Esto es posible, dado que no hay otro dispositivo conectado al módulo I²C del microcontrolador, por lo que no se generan interferencias ⁸⁴, y el sensor puede funcionar adecuadamente.

El protocolo de comunicación incluye una condición de inicio, un bloque de datos tanto de lectura como de escritura, y un bit de confirmación o ACK. La comunicación se basa en dos pines, uno de reloj (SCK) que siempre debe ser de salida, y se utiliza para sincronizar el microcontrolador y el sensor, y un pin de datos bidireccional (DATA), que se utiliza tanto para dar instrucciones al SHT71 como para obtener datos de este.

Data es un pin de drenador abierto, lo que hace necesario implementar una resistencia pull-up en esta línea a Vcc de 10k Ω , como lo muestra la figura 78.

Figura 78. Conexión del sensor SHT71 con el microcontrolador.

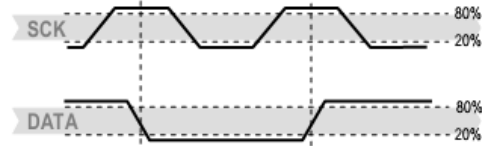


Fuente: (Sensirion AG 2011)

Para iniciar una transmisión, una secuencia llamada "inicio de la transmisión" debe ser emitida. La figura 79 muestra la secuencia de inicio de transmisión, que consiste en el siguiente listado de estados lógicos: SCK=0 y DATA=1, SCK=1 y DATA=0, SCK=0 y SCK=1, DATA=1 y SCK=0

⁸⁴ SENSIRION AG, 2011, Datasheet SHT7x (SHT71, SHT75) Humidity and Temperature Sensor IC. [online]. 2011. [Accessed 24 October 2013]. Available from: http://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/Humidity/Sensirion_Humidity_SHT7x_Datasheet_V5.pdf

Figura 79. Secuencia de inicio de transmisión.



Fuente: (Sensirion AG 2011)

Después de la emisión de la secuencia de inicio de transmisión, el microcontrolador debe enviar el comando de medición de cada variable al sensor, estos estados se reúnen en la tabla 22. Cada comando debe ir precedido de tres bits de dirección ('000'), por lo que en realidad el comando resulta ser de ocho bits.

Tabla 22. Lista de comandos del sensor SHT71

Comando	Código
Reservado	0101x – 1110x
Medir Temperatura	00011
Medir Humedad	00101
Lectura del registro de estado	00111
Escritura del registro de estado	00110
Reset por software	11101

Fuente: (Sensirion AG, 2011)

Para la recepción de la medida, sea de temperatura como de humedad, luego de enviar el código como se describió anteriormente, el microcontrolador tiene que esperar a que se efectúe la medida, esto demora 11/55/210 ms para una medición de 8/12/14 bit (para este proyecto se usan 12 bits para humedad y 14 para temperatura), lo cual puede variar mas ó menos 30% según el oscilador interno. El sensor hará bajar la línea de datos (DATA) a cero cuándo la señal de reloj llegue al noveno pulso; ese bit se denomina ACK (Acknowledge), é indica la finalización de la medida, por lo cual el controlador deberá esperar a la señal llamada "data ready" antes de cambiar de nuevo SCK.

El sensor responde con tres bytes, 2 de datos y uno de corrección de errores o checksum. Esta corrección de errores se hace a través de código de redundancia cíclica (CRC). El microcontrolador debe reconocer cada byte poniendo la línea de datos (DATA) en cero. El bit más significativo MSB en primer lugar, con corrimiento de bits hacia la derecha, (por ejemplo, el quinto SCK es el bit más significativo para un valor de 12 bits, para un resultado de 8 bits el primer byte no se utiliza). La comunicación termina después del bit ACK del código CRC. Si no se recibir el código de comprobación de errores de 8 bits (CRC 8), el microcontrolador puede terminar la comunicación después del bit menos significativo (lsb) del dato de medida manteniendo el bit ACK en alto. El dispositivo vuelve automáticamente al modo de suspensión (sleep mode) luego de finalizada la medición y la comunicación.

El diagrama de temporización de la figura 80, muestra la secuencia de inicio de transmisión, el comando de medición de humedad, el estado del noveno bit de SCK (ACK), y el código CRC de ocho bits (CRS-8).

Figura 80. Ejemplo de una secuencia de medida de humedad relativa.

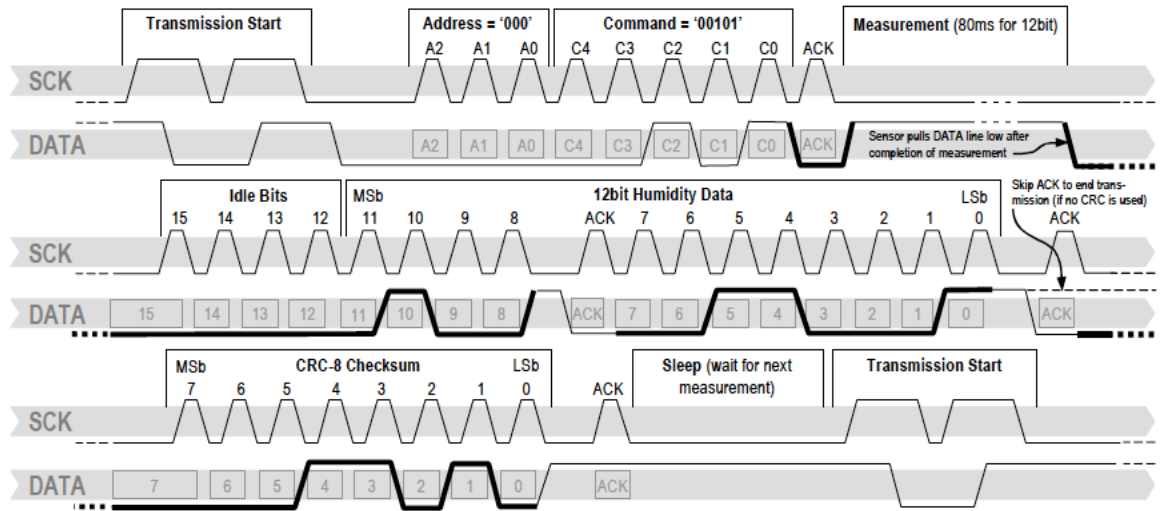
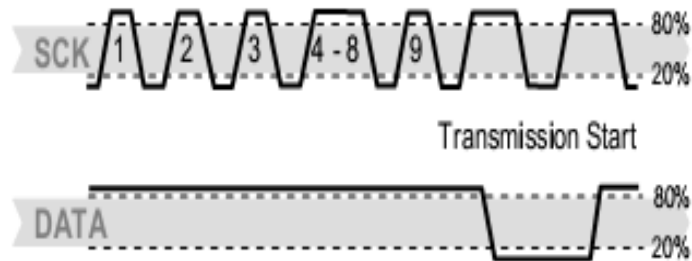


Figure 12: Example RH measurement sequence for value "0000'0100'0011'0001" = 1073 = 35.50%RH (without temperature compensation). DATA valid times are given and referenced in boxes on DATA line. Bold DATA lines are controlled by sensor while plain lines are controlled by the micro-controller.

Fuente: (Sensirion AG, 2011)

Si la comunicación entre el microcontrolador y el sensor es interrumpida por alguna razón, la siguiente secuencia de señal se puede utilizar para reiniciarla. La secuencia de reinicio consiste en alternar la línea SCK nueve o más veces, mientras se mantiene la línea de datos de alta. Esta debe ser seguida por una secuencia de inicio de transmisión antes del siguiente comando. Esta secuencia únicamente reinicia la interfaz. El registro de estado conserva su contenido. La figura 81 muestra la secuencia de reinicio.

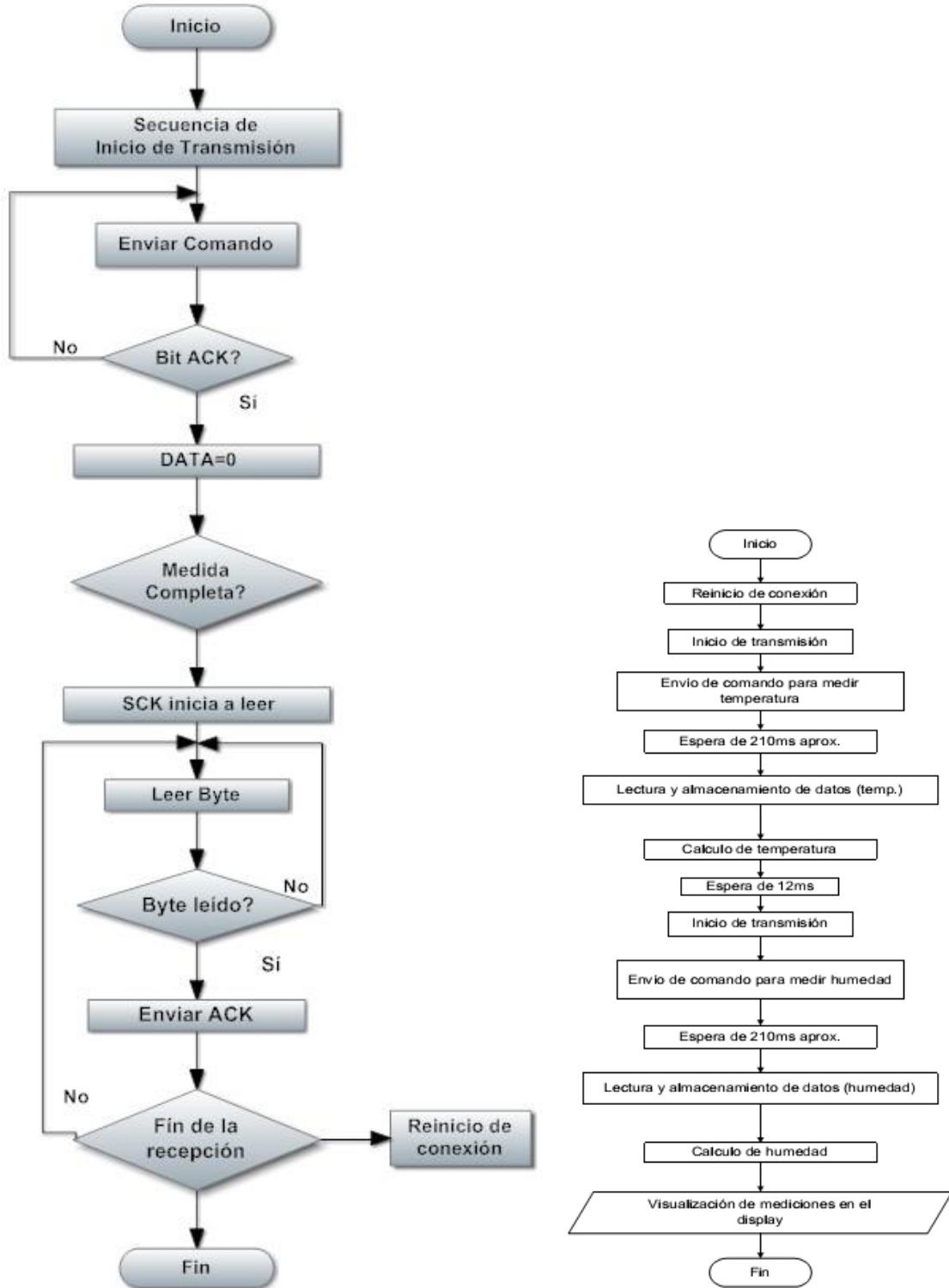
Figura 81. Secuencia de reinicio de comunicación.



Fuente: (Sensirion AG, 2011)

El diagrama de flujo de la figura 82 indica el orden general de los acontecimientos a seguir para solicitar al sensor la toma de mediciones de ambas variables.

Figura 82. Diagrama de flujo de las secuencias para obtener medidas del sensor SHT71



Fuente: Autor.

5.1.1 Conversión a los valores físicos.

- **Humedad Relativa**

Debido relación no lineal entre la salida digital o lectura de humedad (SO_{RH}) y la humedad relativa (RH) para el sensor SHT71, los datos del mismo deben ser procesados antes de ser convertidos a cantidad física real de humedad relativa. Para ello se recomienda se recomienda convertir SO_{RH} con la siguiente fórmula con coeficientes [51] dados en la tabla 23:

$$RH_{linear} = c_1 + c_2 + c_3 \cdot SO_{RH}^2 \quad (1)$$

Tabla 23. Coeficientes de conversión de humedad relativa

SO_{RH}	c_1	c_2	c_3
12 bit	-2.0468	0.0367	-1.5955E-6
8 bit	-2.0468	0.5872	-4.0845E-4

Fuente: (Sensirion AG 2011)

Para temperaturas significativamente diferentes de 25 ° C (~ 77 ° F) la señal de humedad requiere compensación de temperatura. La corrección de temperatura corresponde aproximadamente a 0,12% HR / ° C @ 50% RH. Los coeficientes para la compensación de temperatura de la tabla 23 están relacionados con la siguiente ecuación, donde RH_{True} es el valor de la humedad relativa luego de ser linealizada la lectura del sensor.

$$RH_{true} = (T_{°C} - 25) \cdot (t_1 + t_2 + SO_{RH}) + RH_{linear} \quad (2)$$

Tabla 24. Coeficientes de compensación de temperatura.

SO_{RH}	t_1	t_2
12 bit	0.01	0.00008
8 bit	0.01	0.00128

Fuente: (Sensirion AG, 2011)

- **Temperatura**

La medida de temperatura es lineal, así que la salida digital (SO_T) puede ser convertida en valor de temperatura real de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$T = d_1 + d_2 \cdot SO_T$$

Dónde d_1 y d_2 son los coeficientes de conversión de temperatura, consignados en la tabla 25.

Tabla 25. Coeficientes de conversión de temperatura.

VDD	d ₁ (°C)	d ₁ (°F)	SO _T	d ₂ (°C)	d ₂ (°F)
5V	-40.1	-40.2	14bit	0.01	0.018
4V	-39.8	-39.6	12bit	0.04	0.072
3.5V	-39.7	-39.5			
3V	-39.6	-39.3			
2.5V	-39.4	-38.9			

Fuente: (Sensirion AG 2011)

5.2 SENSORES DE LUZ, PRESIÓN Y ACELERÓMETRO

Los sensores van conectados a los canales analógicos del microcontrolador MC9S08JM16. Para ello es necesario configurar los diferentes registros necesarios para trabajar con el analog to digital converter.

5.3 MÓDULOS XBEE

La interconexión de los módulos XBee con los microcontroladores (MC9S08JM16 y MC9S08JM60) es muy simple, porque ambos se comunican con una interfaz serial UART (en el caso de los microcontroladores de Freescale Semiconductor se denomina SCI), usando únicamente cuatro pines: VDD, GND, DIN, DOUT. El pin DIN se conecta al pin RX del microcontrolador y DOUT se conecta al pin de TX. Los circuitos esquemáticos de conexión de pines se muestran en las figuras 66 y 84 de capítulo 3.

Esta conexión es básica para el funcionamiento de cada módulo, y corresponde al modo de operación transparente (AT). 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 Xbee⁸⁵.

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 [86]. Características suficientes para los requerimientos de este proyecto.

Para configurar los módulos Xbee en modo transparente para una red punto a punto, es necesario seguir los siguientes pasos:

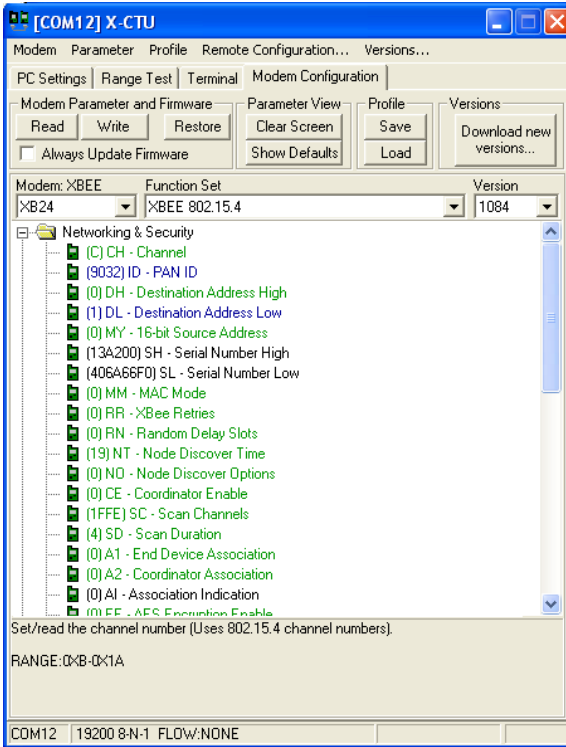
⁸⁵ DIGI INTERNATIONAL INC, 2008c, *X-CTU Configuration & Test Utility Software User Guide* [online]. 2008. Available from: http://ftp1.digi.com/support/documentation/90001003_A.pdf

1. Instalar y ejecutar el software X-CTU [87] (software libre de Digi), para configurar los módulos Xbee.
2. Conectar el módulo Xbee por puerto USB al PC, mediante una board o placa de desarrollo de Digi u otra que contenga un chip de FTDI para simular un puerto serial virtual. Para ello es necesario instalar los drivers VCP (Virtual COM Port) [88].
3. Abrir interface X-CTU y elegir el COM # (puerto que detecta la interface X-CTU al módulo XBee)
4. Verificar que el dispositivo está listo para usarse. Para ello se realiza un test de conexión presionando el botón "Test/Query". Esta opción también permite conocer (en una ventana emergente) el tipo de módulo Xbee, la versión del firmware y el número de serie o identificación del mismo.
5. Ir a Modem Configuration y dar click en Read (Figura 8), luego a Restore (así se restauran los parámetros de fábrica), ir a la ventana PC Setting y leerlo nuevamente (no requiere salir del X-CTU). Se configuran los siguientes comandos:
 - PAN-ID (Es el número de identificación de Personal Area Network, se coloca un número de 3 ó 4 cifras. Este número deberá ser igual en ambos módulos Xbee).
 - DH (Dirección de destino alta, se refiere al número único de los módulos Xbee igual para ambos).
 - DL (Dirección de destino baja).
 - BD (Baud Rate es igual para los dos módulos).
 - MY (Es la dirección propia del módulo)

Para establecer una comunicación punto a punto sólo se debe configurar la dirección. Para ello se utilizan los comandos MY y DL. La idea, es definir arbitrariamente una dirección para un módulo, usando el comando MY, el cual se va a comunicar con otro que tiene la dirección DL, también definida arbitrariamente. Con esto cada módulo define su dirección MY, y escribe la dirección del módulo al cual se desea conectar usando DL.

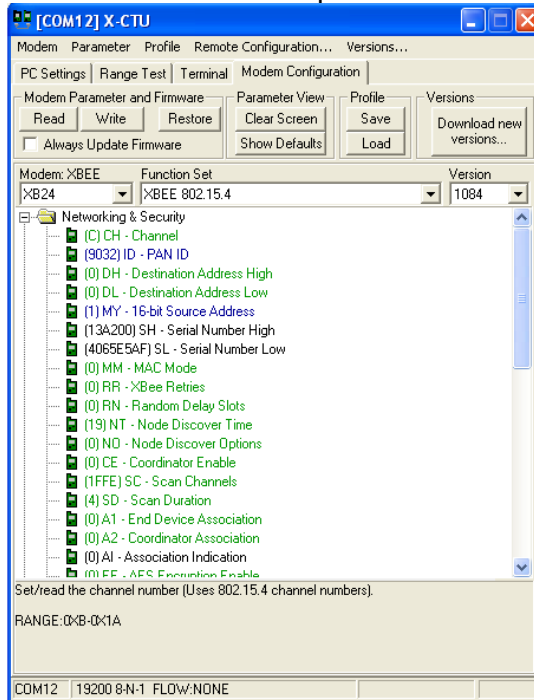
Finalmente, luego de seguir los pasos descritos anteriormente, se tiene la configuración de un módulo Xbee como transmisor (dispositivo final) y otro como receptor (Coordinador), los cuales trabajarán a una velocidad de transmisión de 19200 baudios (parámetro que puede ser cambiado si se lo desea). Los módulos han sido configurados mediante el software gráfico X-CTU, tal como se observa en las siguientes figuras 83 y 84:

Figura 83. Configuración del módulo XBEE transmisor



Fuente: Autor

Figura 84. Configuración del módulo XBEE receptor



Fuente: Autor

6. DISEÑO DE ALGORITMOS Y SOFTWARE

Los microcontroladores fueron programados a través del entorno de desarrollo Codewarrior IDE siguiendo las pautas para cargar el código a través del conector BDM personalizado de la herramienta de desarrollo DEMOQE128. La programación que se desarrolló está basada en un conjunto de librerías escritas mediante el uso del lenguaje C[89], especialmente elaboradas para manipular los diferentes periféricos del sistema en conjunto, así como el código fuente (main.c y main.h) que contiene toda la estructura de programación.

6.1 DISEÑO DEL SOFTWARE DEL NODO SENSOR

El software que permite funcionar el nodo sensor en conjunto está basado en un código que cuenta con una serie etapas y librerías que se encargan de inicializar los periféricos (módulo Xbee, SHT71, LX1972, pulsadores). La primera etapa desarrollada en el código fuente trata sobre la inicialización, que incluye de una serie de declaraciones de variables globales, constantes y funciones, y configuración de registros para trabajar con los protocolos de comunicación (SCI y I²C) y el conversor analógico a digital para trabajar con los periféricos.

El programa no necesita para recolectar datos del entorno de una manera oportuna. Por lo tanto, no es necesario utilizar los temporizadores o interrupciones. La instrucción ADCSC1_COCO permite al programa detectar cuándo una conversión se ha llevado a cabo cuándo la bandera de conversión completa (Conversion Complete, COCO se pone a "1". El algoritmo escrito para la inicialización del módulo ADC para conversión simple de 8 bits sin interrupciones y con un tiempo de muestreo de 3.5µs se muestra en la figura 85.

Figura 85. Algoritmo para la inicialización del ADC.

```
void JMADCSet( void ){
    ADCCFG_ADIV = 2; // Se selecciona Long Sample time y se divide el Bus Clock
                    // entre 2
    ADCSC1 = 0; //borra bandera, interrupción deshabilitada, conversión simple,
    ADCSC2 = 0; // Se deshabilita la funcion de comparacion
                    // y se selecciona el software trigger
    APCTL1 = 0x1F; //Canales para Accel-Pressure-Light
}

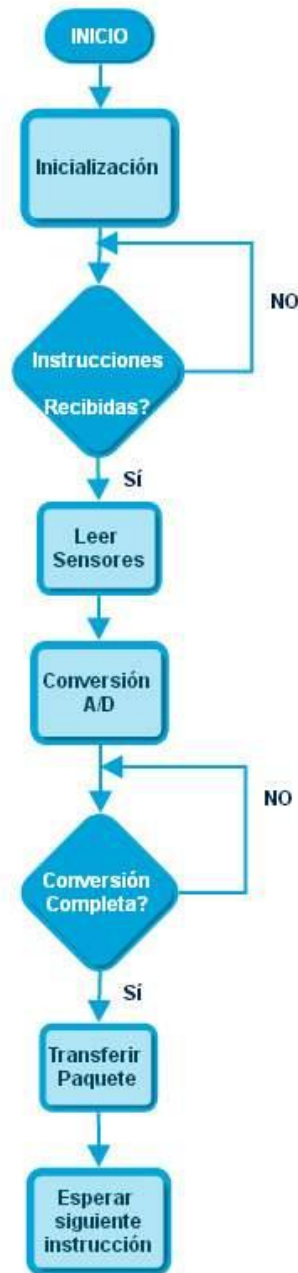
void SampleADC (byte CH){
    ADCSC1_ADCH = CH;
    while (!ADCSC1_COCO); //espera que la bandera conversión completa este en 1
}
```

Fuente: Autor

Al final del proceso de inicialización, el programa va dentro del bucle while y espera una petición de datos. Si se recibe una solicitud de datos, el programa va a explorar rápidamente, lee la salida de los sensores y realiza una conversión de analógico a digital

a las mediciones recolectadas. Cuando se ha completado la conversión, los datos se codifican en un paquete y se envía al módulo xbee por medio de la SCI (a 19200 baudios) al coordinador. La figura 86 presenta el diagrama de flujo general que describe el proceso que realiza el código implementado en el microcontrolador MC9S08JM16 del nodo sensor teniendo en cuenta las etapas de programación anteriormente citadas.

Figura 86. Diagrama de flujo del programa del nodo sensor.



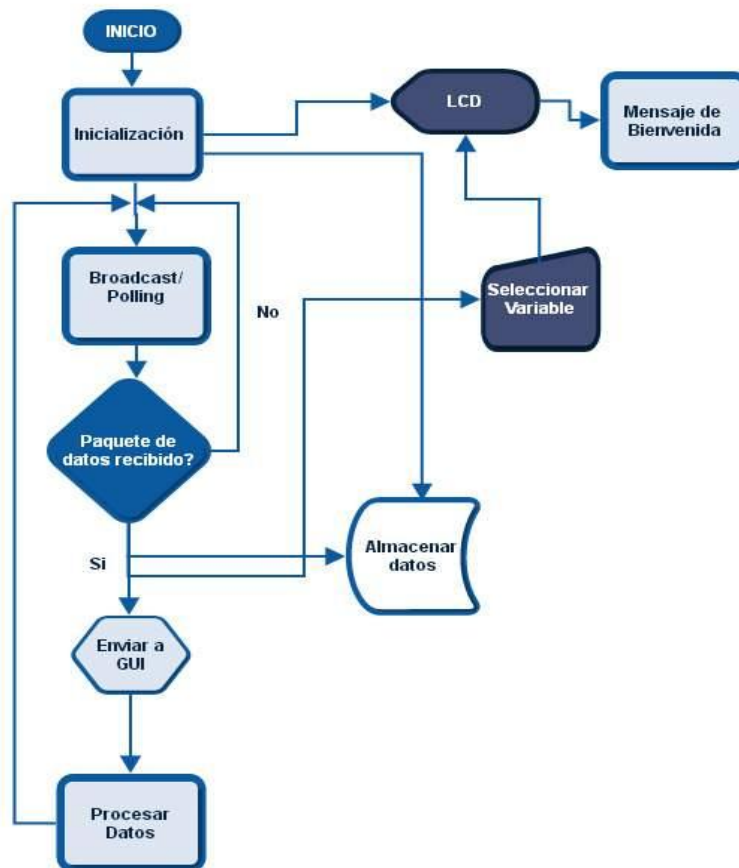
Fuente: Autor

6.2 DISEÑO DEL SOFTWARE DEL COORDINADOR

La figura 87 el diagrama de flujo del software del coordinador. La primera etapa consiste en inicializar y ajustar todos los periféricos (LCD, pulsadores, tarjeta SD, conversor serial a USB, módulo XBee).

La segunda etapa consiste en una petición de datos a través de comunicación serial sin interrupciones (polled). Si el paquete de datos es recibido, el programa salta a la tercera etapa de este código, que es básicamente un mensaje de bienvenida al usuario y la cuarta etapa, consiste en generar una orden mediante el teclado para llevar a cabo una medición en particular que podrá ser visualizada de manera directa a través de una LCD, ó un PC haciendo uso de la interfaz serial- USB (FT2232D). Toda la información recolectada en la medición también estará disponible en formato .txt mediante un historial que se encuentra dentro de la memoria SD. Luego de procesar los datos en la GUI (Interfaz Gráfica de Usuario) el coordinador queda disponible para recibir nuevos datos del nodo sensor.

Figura 87. Diagrama de flujo del programa del coordinador.



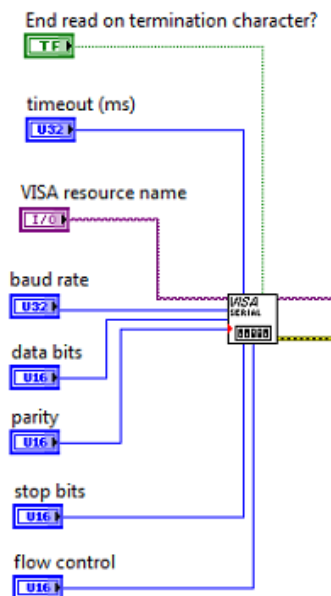
Fuente: Autor

7. DISEÑO DE LA INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO

En este capítulo se indica la estructura y funcionamiento de la interfaz gráfica de usuario (GUI) desarrollada mediante LabView 2009, la cual está centrada en la manipulación del puerto USB del PC para la comunicación con el prototipo mediante un proceso de transmisión y recepción de datos serie (FT2232D). El programa está en capacidad de indicar las mediciones realizadas de temperatura, humedad relativa según la manipulación del usuario.

El puerto serial se configuró mediante la utilización de uno de los módulos VISA⁸⁶ (Serial), este módulo permite adecuar varios parámetros referentes a este tipo de comunicación, como por ejemplo la velocidad de transmisión de los datos que para este caso es de 19200 baudios por ser la velocidad a la cual fueron programados los XBee. También permite seleccionar el puerto COM que se esté utilizando en el equipo de cómputo, entre otros parámetros como por ejemplo paridad, control de flujo, bits de parada, etc.

Figura 88. Configuración del puerto serial (VISA Configure Serial Port).



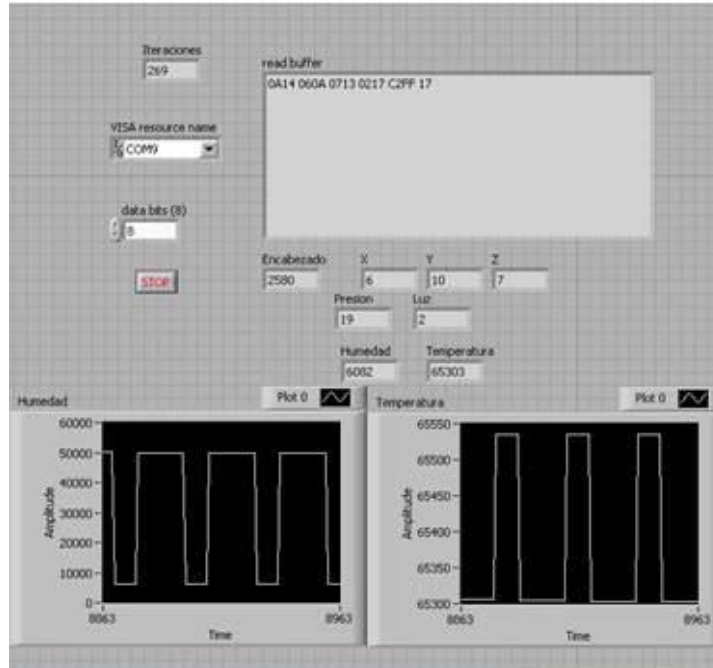
Fuente: Autor

La interfaz tiene configurado un proceso de lectura y escritura mediante los bloques VISA READ y VISA WRITE respectivamente; con el bloque de lectura se lleva a cabo el procesamiento de los datos recibidos en buffer (mediciones) para su visualización en

⁸⁶ ROSADO MEDINA, José, 2011, *Realización de drivers para LabVIEW*. 2011. Universidad Carlos III de Madrid.

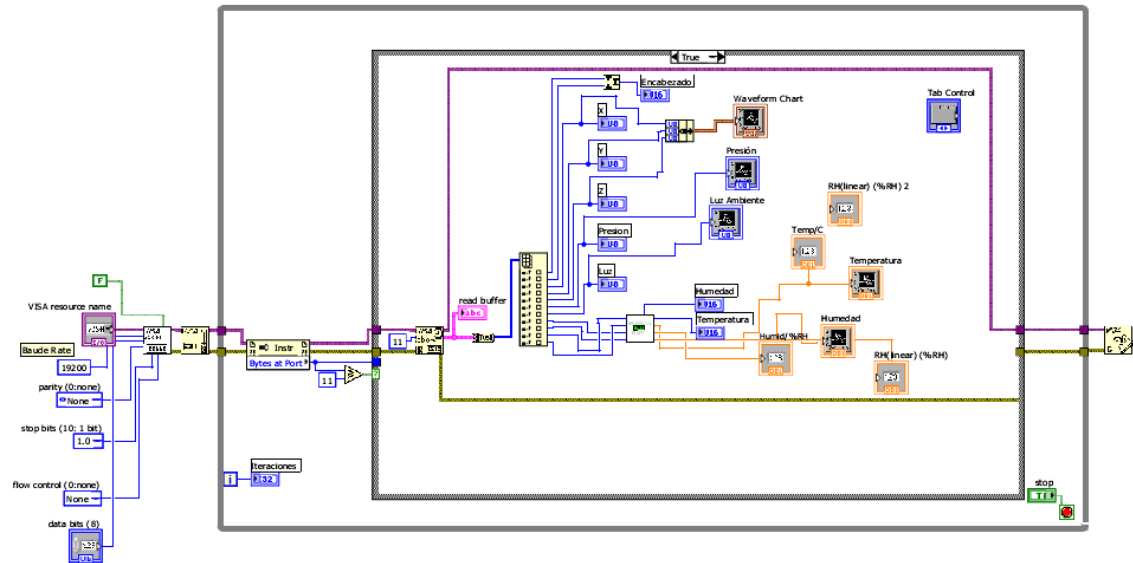
el panel frontal. El resultado final de la GUI se muestra en la figura 89 con el panel frontal y figura 90 con el diagrama de bloques del instrumento virtual que muestra el bloque de configuración del puerto serial (baudios, bits de paridad, selección del COM, etc), el bloque de lectura y un bloque de manejo de datos recibidos.

Figura 89. Panel Frontal.



Fuente: Autor

Figura 90. Diagrama de bloques.



Fuente: Autor

8. PRUEBAS Y RESULTADOS

Este capítulo describe las pruebas que se diseñaron para verificar el alcance de los módulos Xbee

Los resultados de diferentes pruebas experimentales diseñadas para comprobar el funcionamiento del prototipo se describen y se muestran a continuación:

8.1 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

Una vez comprobada la correcta comunicación entre los diferentes elementos del sistema construido, así como de desarrollar la aplicación del VI (instrumento virtual) en LabView, se procedió a probar la correcta conectividad de todo el prototipo así como el funcionamiento adecuado de las tareas que debía cumplir.

8.2 PRUEBAS DE CONECTIVIDAD

8.2.1 Descripción de las pruebas y resultados

Para llevar a cabo estas pruebas se definieron cuatro escenarios diferentes de operación: el primer escenario es un espacio cercano alrededor de dos plantas ornamentales para emular el ambiente de un invernadero. El segundo escenario fue un campo con obstáculos.

▪ Escenario 1: Plantas ornamentales

Esta prueba consistió en situarse en un campo abierto ubicando dos plantas ornamentales. Cerca de cada planta se ubicó el nodo sensor para medir humedad relativa y temperatura del aire circundante alrededor de las plantas.

Los resultados emitidos por el nodo sensor se visualizaron mediante la pantalla LCD. Las figuras 91 y 92 muestran las plantas escogidas para cada prueba en el escenario 1 y los resultados en la LCD.

Figura 91. Planta 1 y de la prueba resultados visualizados en la LCD.



Fuente: Autor

Figura 92. Planta 2 y de la prueba resultados visualizados en la LCD.



Fuente: Autor

Los resultados de esta prueba están consignados en la tabla 26.

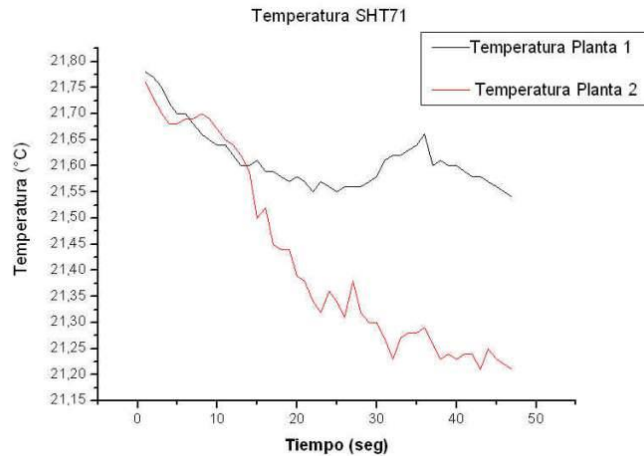
Tabla 26. Resultados de las pruebas en el escenario 1.

Valores LCD Planta 1		Valores LCD Planta 2	
Humedad Relativa (%)	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Temperatura (°C)
41,86	21,78	42,09	21,76
41,93	21,77	42,06	21,73
41,99	21,75	42,02	21,7
42,06	21,72	41,98	21,68
42,15	21,7	41,95	21,68
42,19	21,7	41,95	21,69
42,28	21,68	41,89	21,69
42,28	21,66	41,85	21,7
42,48	21,65	41,89	21,69
42,48	21,64	41,88	21,67
42,54	21,64	41,88	21,65
42,61	21,62	41,85	21,64
42,64	21,6	41,78	21,62
42,67	21,6	41,81	21,59
42,74	21,61	41,8	21,5
42,74	21,59	41,83	21,52
42,8	21,59	41,79	21,45
42,54	21,58	41,83	21,44
34,22	21,57	41,86	21,44
34,26	21,58	41,85	21,39
34,32	21,57	41,85	21,38
34,39	21,55	41,91	21,34
34,43	21,57	41,94	21,32
34,53	21,56	41,98	21,36
34,56	21,55	41,98	21,34
34,63	21,56	42,01	21,31
34,7	21,56	41,94	21,38
34,74	21,56	41,98	21,32
34,77	21,57	42,04	21,3
34,84	21,58	42,11	21,3
34,95	21,61 (*)	42,14	21,27
34,97	21,62	42,13	21,23
34,99	21,62	42,17	21,27
35,01	21,63	42,24	21,28
35,05	21,64	42,3	21,28
35,11	21,66	42,34	21,29
35,18	21,6	42,44	21,26
35,25	21,61	42,47	21,23
35,30	21,6	42,5	21,24
35,33	21,6	42,56	21,23
35,38	21,59	42,63	21,24
35,42	21,58	42,66	21,24
35,46	21,58	42,6	21,21
35,49	21,57	42,63	21,25
35,54	21,56	42,56	21,23
35,6	21,55	42,7	21,22
35,64	21,54	42,66	21,21

Fuente: Autor

Los datos experimentales de la tabla 26 son representados gráficamente en la figura 93. En ella se aprecia una relativa cercanía entre las mediciones.

Figura 93. Comparación de los resultados experimentales del sensor SHT71 alrededor de dos plantas.



Fuente: Autor

8.3 PRUEBAS DE COMPARACIÓN DE MEDIDAS

Para comparar las medidas generadas por el sensor SHT71 se utilizó la estación meteorológica portátil *Kestrel 4500* como estándar o patrón de referencia para determinar la exactitud (para humedad relativa y temperatura) del sensor SHT71.

El escenario de pruebas escogido consistió en un área de pruebas es de 2m x 2m, con plantas ubicadas en distintos lugares. El sensor se ubicó junto a la estación meteorológica y el coordinador a 90 metros de distancia, y se probó durante un intervalo de dos minutos con un tiempo de muestreo de 1 segundo.

Los resultados emitidos por el nodo sensor se visualizaron mediante la LCD del coordinador.

8.3.1 Resultados de la prueba de temperatura y humedad relativa

La tabla 27 muestra la comparación de la diferencia absoluta o error entre las medidas del sensor SHT71 y la estación meteorológica *Kestrel 4500*⁸⁷. El error promedio y la desviación estándar también se calcularon. De acuerdo con el resultado experimental el sensor tuvo una desviación estándar de 0,11°C, es decir una exactitud de $\pm 0,11^\circ\text{C}$. La desviación estándar mide la dispersión de los datos sobre el valor de la media. Una baja

⁸⁷ NK (NIELSEN-KELLERMAN), 2010, *Manual de instrucciones Para los modelos Kestrel 4500 y Kestrel 4500 NV* [online]. 2010. Available from: http://www.nkhome.com/pdfs/k4500Span_WEB.pdf; http://www.nkhome.com/pdfs/k45_web.pdf

desviación estándar indica que los datos tienden a ser muy cerca de la media, mientras que una alta desviación estándar indica que los datos están distribuidos en un amplio rango de valores. En base a esta teoría, es posible concluir que el sensor SHT71 tuvo buen comportamiento en cuanto a exactitud.

Tabla 27. Comparación de medidas de temperatura y humedad relativa entre SHT71 y Kestrel 4500

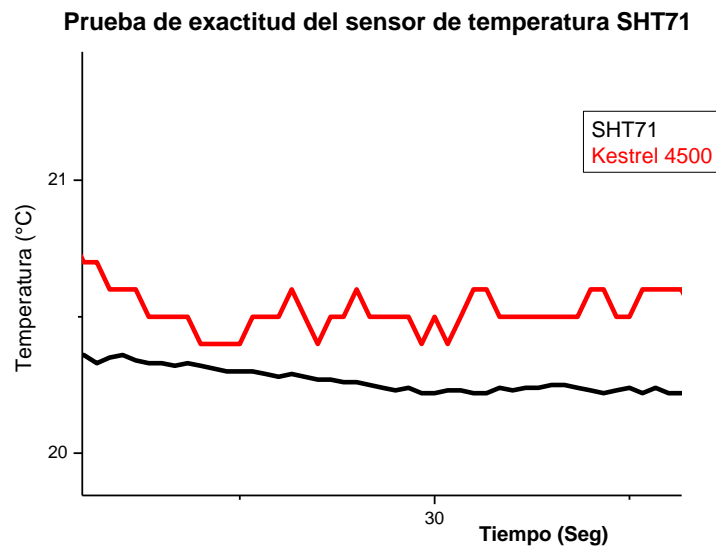
Temperatura				Humedad Relativa			
SHT71	Kestrel 4500	Error		SHT71	Kestrel 4500	Error	
T (°C)	T (°C)	Error (°C)	% Error Temp	RH (%)	RH (%)	Error(%)	%Error Hum
20,35	20,8	0,45	2,21	56,25	55,4	0,85	1,51
20,36	20,8	0,44	2,16	56,25	55,5	0,75	1,33
20,36	20,7	0,34	1,67	56,22	55,6	0,62	1,10
20,33	20,7	0,37	1,82	56,22	55,7	0,52	0,92
20,35	20,6	0,25	1,23	56,19	55,8	0,39	0,69
20,36	20,6	0,24	1,18	56,19	55,9	0,29	0,52
20,34	20,6	0,26	1,28	56,16	56	0,16	0,28
20,33	20,5	0,17	0,84	56,16	56,1	0,06	0,11
20,33	20,5	0,17	0,84	56,13	56,2	0,07	0,12
20,32	20,5	0,18	0,89	56,13	56,2	0,07	0,12
20,33	20,5	0,17	0,84	56,1	56,3	0,2	0,36
20,32	20,4	0,08	0,39	56,1	56,3	0,2	0,36
20,31	20,4	0,09	0,44	56,07	56,4	0,33	0,59
20,3	20,4	0,10	0,49	56,04	56,7	0,66	1,18
20,3	20,4	0,10	0,49	56,06	56,7	0,64	1,14
20,3	20,5	0,20	0,99	56,09	56,7	0,61	1,09
20,29	20,5	0,21	1,03	56,09	56,8	0,71	1,27
20,28	20,5	0,22	1,08	56,12	56,9	0,78	1,39
20,29	20,6	0,31	1,53	56,12	56,9	0,78	1,39
20,28	20,5	0,22	1,08	56,15	57	0,85	1,51
20,27	20,4	0,13	0,64	56,18	57	0,82	1,46
20,27	20,5	0,23	1,13	56,24	57,1	0,86	1,53
20,26	20,5	0,24	1,18	56,27	57,1	0,83	1,48
20,26	20,6	0,34	1,68	56,3	57,2	0,9	1,60
20,25	20,5	0,25	1,23	56,36	57,3	0,94	1,67
20,24	20,5	0,26	1,28	56,41	57,3	0,89	1,58
20,23	20,5	0,27	1,33	56,47	57,3	0,83	1,47
20,24	20,5	0,26	1,28	56,43	57,3	0,87	1,54
20,22	20,4	0,18	0,89	56,56	57,4	0,84	1,49
20,22	20,5	0,28	1,38	56,68	57,4	0,72	1,27
20,23	20,4	0,17	0,84	56,75	57,4	0,65	1,15
20,23	20,5	0,27	1,33	56,77	57,4	0,63	1,11
20,22	20,6	0,38	1,88	56,8	57,4	0,6	1,06
20,22	20,6	0,38	1,88	56,85	57,3	0,45	0,79
20,24	20,5	0,26	1,28	56,89	57,3	0,41	0,72
20,23	20,5	0,27	1,33	56,92	57,4	0,48	0,84
20,24	20,5	0,26	1,28	56,98	57,3	0,32	0,56
20,24	20,5	0,26	1,28	57,01	57,2	0,19	0,33
20,25	20,5	0,25	1,23	57,04	57,1	0,06	0,11
20,25	20,5	0,25	1,23	57,05	57	0,05	0,09
20,24	20,5	0,26	1,28	57,07	57,1	0,03	0,05
20,23	20,6	0,37	1,83	57,09	57,1	0,01	0,02
20,22	20,6	0,38	1,88	57,12	57	0,12	0,21
20,23	20,5	0,27	1,33	57,14	57	0,14	0,25

20,24	20,5	0,26	1,28	57,19	57,1	0,09	0,16
20,22	20,6	0,38	1,88	57,21	57,1	0,11	0,19
20,24	20,6	0,36	1,78	57,24	57,1	0,14	0,24
20,22	20,6	0,38	1,88	57,3	57	0,3	0,52
20,22	20,6	0,38	1,88	57,36	57,1	0,26	0,45
20,22	20,5	0,28	1,38	57,39	57,1	0,29	0,51
20,23	20,6	0,37	1,83	57,42	57,1	0,32	0,56
20,24	20,5	0,26	1,28	57,45	57,1	0,35	0,61
20,22	20,5	0,28	1,38	57,48	57,1	0,38	0,66
20,22	20,5	0,28	1,38	57,51	57	0,51	0,89
20,23	20,4	0,17	0,84	57,54	57	0,54	0,94
20,22	20,4	0,18	0,89	57,55	57,1	0,45	0,78
20,23	20,3	0,07	0,35	57,57	57,1	0,47	0,82
20,24	20,2	0,04	0,20	57,6	57,2	0,4	0,69
20,23	20,2	0,03	0,15	57,6	57,3	0,3	0,52
20,22	20,2	0,02	0,10	57,6	57,4	0,2	0,35
20,24	20,2	0,04	0,20	57,63	57,5	0,13	0,23
20,23	20,2	0,03	0,15	57,66	57,6	0,06	0,10
Error Max		0,45				0,94	
Error Promedio		0,24				0,44	
Desv Estándar		0,11				0,29	
Desv Promedio		0,08				0,25	

Fuente: Autor

Los datos experimentales de temperatura de la tabla 27 son representados gráficamente en la figura 94. En ella se aprecia la diferencia o error entre las medidas.

Figura 94. Comparación de los resultados experimentales del sensor de temperatura SHT71 y la estación meteorológica Kestrel 4500.

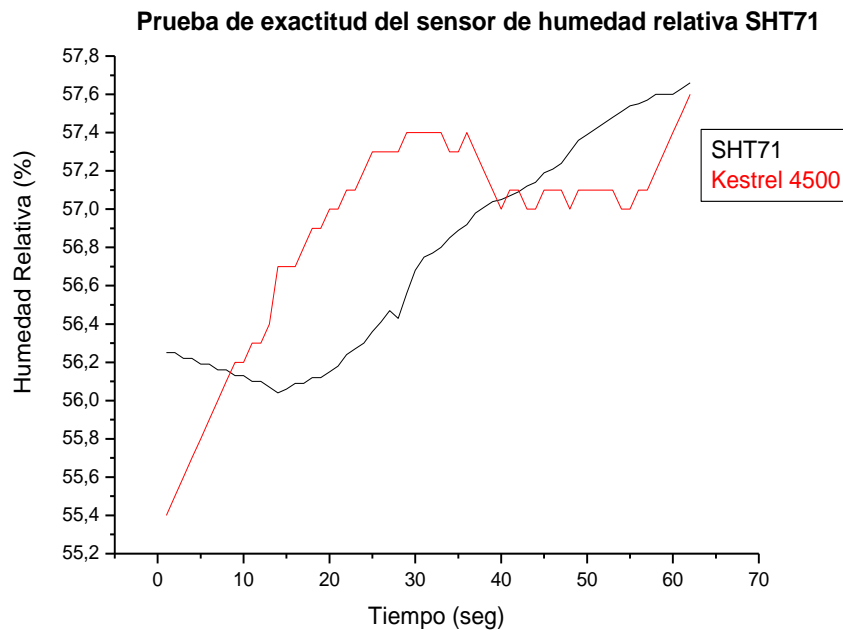


Fuente: Autor

De la tabla 27 se puede destacar la baja desviación estándar (0,29 %HR), lo cual indica una exactitud exactitud de $\pm 0,11^{\circ}\text{C}$ del sensor SHT71. Durante el experimento, se descubrió que el sensor SHT71 tiene un tiempo de respuesta más rápido que Kestrel 4500 (de acuerdo con el experimento, se tarda aproximadamente 5 segundos para la para responder a cualquier cambio en el entorno, mientras que el tiempo de respuesta del SHT71 es casi instantáneo).

Los datos experimentales de temperatura de la tabla 27 son representados gráficamente en la figura 95. En ella se aprecia la diferencia o error entre las medidas.

Figura 95. Comparación de los resultados experimentales del sensor de humedad relativa SHT71 y la estación meteorológica Kestrel 4500.



Fuente: Autor

8.4 PRUEBAS DE COMUNICACIÓN DE DATOS.

Se realizaron pruebas de comunicación de datos con los módulos Xbee utilizando el software X-CTU y la placa de desarrollo USB⁸⁸ (ver figura 96).

⁸⁸ DIGI INTERNATIONAL INC, 2012, *XBee/XBee-PRO® 802.15.4 Professional Kit Getting Started Guide* [online]. 2012. Available from: http://ftp1.digi.com/support/documentation/90002159_A.pdf

Figura 96. Placa de desarrollo USB de Xbee.



Fuente: (Digi International Inc 2012)

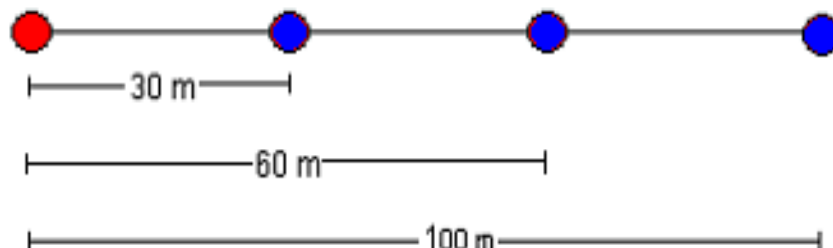
8.4.1 Prueba con línea de vista (Outdoor)

La prueba se realizó con línea de vista (Outdoor) separando los dispositivos Xbee para verificar a qué distancia se pierde la comunicación. La figura 97 describe las distancias que separan al receptor (ícono rojo) del transmisor (ícono azul).

Se tomaron medidas de recepción de paquetes y el nivel RSSI (Received Signal Strength Indicator) del paquete recibido a 30 m (figura 98), a 60 m (figura 99) y a 100 m de distancia (figura 100).

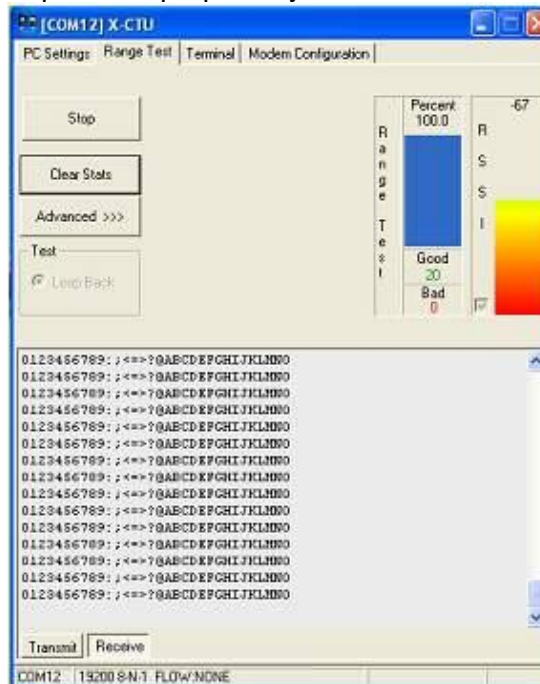
Para la prueba se utilizó dos dispositivos Xbee, dos laptops y dos placas de desarrollo USB de digi. En el software X-CTU se utilizó la opción Range-test con su configuración por defecto. Esta configuración consiste en el envío de 32 bytes de datos de un dispositivo a otro, el cual devuelve la trama de datos hacia el origen.

Figura 97. Diagrama para prueba con línea de vista.



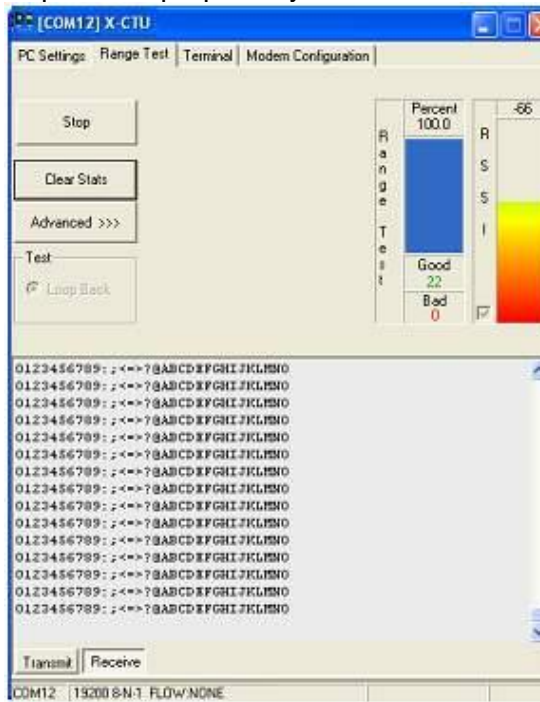
Fuente: Autor

Figura 98. Medida de recepción de paquetes y RSSI a 30 m



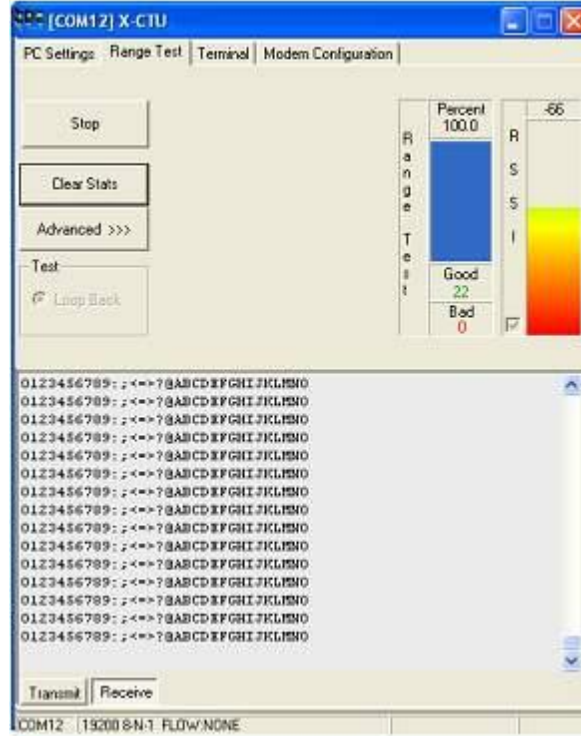
Fuente: Autor

Figura 99. Medida de recepción de paquetes y RSSI a 60 m



Fuente: Autor

Figura 100. Medida de recepción de paquetes y RSSI a 100 m



Fuente:

La prueba con línea de vista demuestra que a la distancia de 30 m se mantiene un 100% de recepción de paquetes con un nivel de recepción de -67dBm y a la distancia de 60 m se mantiene un 100% de recepción de paquetes con un nivel de recepción de -66dBm .

Hasta los 100 m de distancia la recepción de paquetes es normal y con un buen nivel de RSSI mayor a -75dBm . Pasada esta distancia, la comunicación se mantiene sin pérdida de paquetes únicamente si la línea de vista está completamente libre. En el caso de colocarse un obstáculo obstruyendo la línea de vista (por más pequeño que sea), la recepción se presenta con pérdida de varios paquetes.

8.4.2 Prueba sin línea de vista (Indoor)

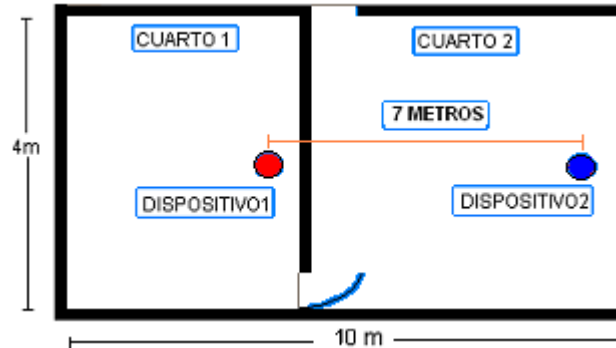
Se realizó una prueba sin línea de vista (Indoor) en un ambiente casero que (dos cuartos separados) que dispone de paredes de 10cm construidas con bloque y loza de concreto de 20 cm. Esta prueba corresponde a un escenario diferente, con el objetivo de verificar el rango de alcance con obstáculos.

Para la prueba se utilizó dos dispositivos Xbee, dos laptops y dos placas de desarrollo USB de digi. En el software X-CTU se utilizó el módulo Range-test con su configuración por default.

Esta configuración consiste en el envío de 32 bytes de datos de un dispositivo a otro el cual devuelve la trama de datos hacia el origen.

La figura 101 muestra el lugar y distancia de instalación de los equipos, la figura 102 muestra la prueba de rango y el RSSI (-dBm) medidas en el dispositivo 1.

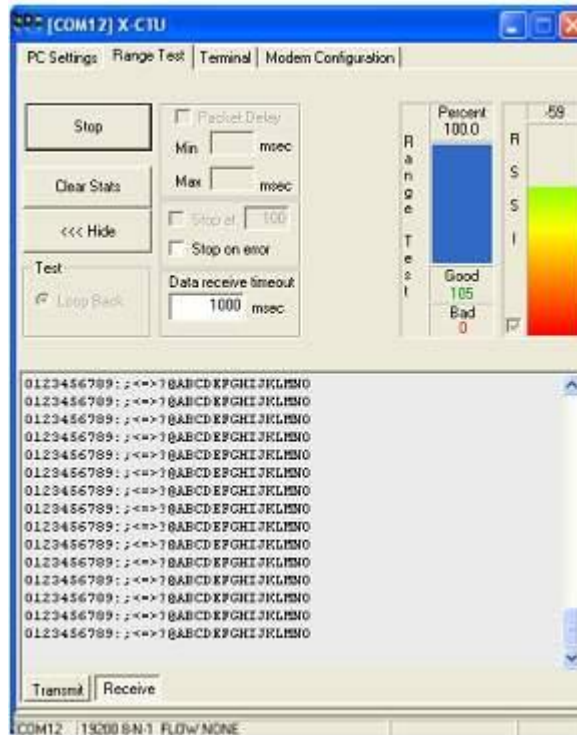
Figura 101. Lugar de instalación de los equipos para prueba sin línea de vista.



Fuente: Autor

La prueba de comunicación entre los dos dispositivos Xbee fue exitosa y demuestra que en las condiciones descritas y la distancia especificada se mantiene un 100% de recepción de paquetes sin pérdida de los mismos en una transmisión de 105 tramas con un nivel de recepción de -59 dBm.

Figura 102. Medida de recepción de paquetes y RSSI para Prueba 1.



Fuente: Autor

CONCLUSIONES

La red inalámbrica de sensores desarrollada se caracteriza por tener una topología en estrella empleando el protocolo Zigbee. Esta red conforma un sistema escalable que permite transmitir valores de humedad relativa y temperatura entre el coordinador y un dispositivo final para ser mostrados en una LCD.

El nodo sensor y el coordinador fueron construidos a partir del diseño de tarjetas de circuito impreso (PCB) de doble capa, constituidas completamente con componentes SMD y con materiales de última generación como FR4, dando como resultado dos dispositivos de tamaño reducido, ofreciendo mayor portabilidad.

El diseño de la interfaz gráfica elaborada con Labview, permite leer y visualizar datos generados por los sensores utilizados en la aplicación. La fuente de datos proviene de archivos planos delimitados.

Los sensores utilizados en este proyecto se eligieron siguiendo la clasificación hecha en las secciones 2.14 y 2.15, a partir de las cuales se destaca las ventajas de trabajar con sensores de salida digital y cuyo acondicionamiento de señal está integrado dentro del mismo chip que contiene el elemento sensor que está en contacto directo con las variables a medir. Lo anterior representa una ventaja respecto al tamaño de la PCB del nodo sensor pues se reduce las dimensiones, haciéndolo más compacto y de fácil manipulación.

Adicionalmente, la tecnología usada en este caso Freescale es utilizada en el desarrollo de soluciones tecnológicas en el sector industrial, que además de ser empleada en invernaderos, puede ser utilizada en otros campos de aplicación, como la agricultura de precisión, bioingeniería industria automotriz etc.

RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

Si es necesario cubrir distancias superiores entre el dispositivo final o nodo sensor y el coordinador, es recomendable usar módulos Xbee Pro serie 1 o serie 2 para lograr mayor estabilidad en el proceso de comunicación. La programación y configuración es idéntica a la realizada en los Xbee S1 usados en este proyecto de y su conexión dentro de las placas (PCB) no varía, de modo que basta con retirar y cambiar los módulos.

Se recomienda para trabajos futuros, continuar mejorando el código del microcontrolador y realizar cambios en la configuración del modulo XBee, para conseguir que los nodos entren en modo de bajo consumo. Para conseguir el mismo propósito, es aconsejable configurar los microcontroladores en modo STOP y WAIT que Freescale ofrece como alternativas de operación de bajo consumo.

El prototipo de sistema de monitoreo en invernaderos está diseñado de tal manera que se pueda llegar a una implantación real con miras a incorporar nuevas funciones y mejorar las funciones ya existentes; otras variables como luz o presión atmosférica serían ideales para añadir, al igual que la transmisión de datos de las medidas en tiempo real a la interfaz grafica de usuario, aprovechando las ventajas que ofrece el chip FT2232D. De esta manera se recomienda la incorporación de sistemas de control, para obtener un sistema realimentado que permita automatizar el invernadero estableciendo algún tipo de sistema de control.

Se recomienda ejecutar planes de capacitación del personal que tiene acceso a los invernaderos una vez el sistema entre en producción, debido a que los usuarios de este tipo de ambientes no están acostumbrados a manejar grandes cantidades de información durante los procesos de cultivo. Esto será importante para lograr que los invernaderos obtengan mayores beneficios con la utilización de esta tecnología.

REFERENCIAS

ABBASI, Abu Zafar, ISLAM, Noman and SHAIKH, Zubair Ahmed, 2011, A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture. *Computer Standards & Interfaces* [online]. 2011. [Accessed 24 October 2013]. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920548911000353>

ADAM, N. and FREY, J., 2006, Redes de sensores inalámbricos. Nuevas soluciones de interconexión para la automatización industrial. *Revista ABB*. 2006. Vol. 2.

ALFONSO SÁNCHEZ, Manuel Ricardo, 2009, *Diseño y evaluación de una red de nodos zigbee*. Trabajo de grado. Bogotá D.C : Escuela Colombiana de Carreras Industriales ECCI. Facultad de Ingeniería Electrónica.

ALLIANCE, ZigBee, 2006, ZigBee specification. *Document 053474r06, Version* [online]. 2006. Vol. 1. Available from: <http://www.zigbee.org>

ARELLANO MAULEÓN, Francisco Javier, CALDERÓN SETIÉN, Francisco and SOMOVILLA DE LA TORRE, Sergio, 2006b, Diseño y fabricación de una placa didáctica basada en FPGA. [online]. 2006. [Accessed 25 October 2013]. Available from: <http://eprints.ucm.es/8910/>

ARELLANO MAULEÓN, Francisco Javier, CALDERÓN SETIÉN, Francisco and SOMOVILLA DE LA TORRE, Sergio, 2006a, Diseño y fabricación de una placa didáctica basada en FPGA. [online]. 2006. [Accessed 25 October 2013]. Available from: <http://eprints.ucm.es/8910/>

ARENY, Ramón Pallás, 2003, *Sensores y acondicionadores de señal*. Cuarta edición. Marcombo. ISBN 8426713440.

BARONTI, Paolo, PILLAI, Prashant, CHOOK, Vince WC, CHESSA, Stefano, GOTTA, Alberto and HU, Y. Fun, 2007, Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15. 4 and ZigBee standards. *Computer communications*. 2007. Vol. 30, no. 7, p. 1655–1695.

BARRENETXEA, Guillermo, INGELREST, Fran\ccois, SCHAEFER, Gunnar and VETTERLI, Martin, 2008, Wireless sensor networks for environmental monitoring: the sensorscope experience. In : *Communications, 2008 IEEE International Zurich Seminar on*. 2008. p. 98–101.

BURR BROWN PRODUCTS FROM TEXAS INSTRUMENTS, 2003, *SOLDER PAD RECOMMENDATIONS FOR SURFACE-MOUNT DEVICES* [online]. 2003. Available from: <http://www.ti.com/lit/an/sbfa015a/sbfa015a.pdf>

BUSINESS WEEK MAGAZINE, 1999, 21 Ideas For The 21st Century. *21 Ideas For The 21st Century* [online]. 1999. [Accessed 24 October 2013]. Available from: http://www.businessweek.com/1999/99_35/2121_content.htm

CALDERÓN-VIELMA, Jesús A, 2006, Fundamentos De Las Mediciones Eléctricas Teoría Y Prácticas De Laboratorio. [online]. 2006. [Accessed 24 October 2013]. Available from: <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/damarquezg/LIBFUND1.pdf>

CAMPBELL SCIENTIFIC, 2010, *Solar Radiation Sensors* [online]. 2010. Available from: <http://www.campbellsci.com/solar-radiation>

CASADO, Luis, 2007, *Nueva familia de microcontroladores de 8 y 32 Bits FLEXIS de Freescale* [online]. 2007. Available from: <http://www.bairesrobotics.com.ar/data/flexis.pdf>

CIFUENTES GARCÍA, Carlos Andrés, 2011, *Diseño e implementación de una red inalámbrica de sensores aplicados a la instrumentación biomédica. Tesis de maestría.* Oro Verde, Argentina : Universidad Nacional de Entre Ríos.

CORRAL, Pablo, CORONADO, Beatriz, DE CASTRO LIMA, Antonio Cezar and LUDWIG, Oswaldo, 2012, Design of automatic meter reading based on Zigbee. *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)*. 2012. Vol. 10, no. 1, p. 1150–1155.

DEZAN DE BONA, D, DE SALVADOR FERREIRA, G and SCHWARZ, L, 2010, Sensoriamento remoto em pranchas de surfe utilizando tecnologia ZigBee. In : *Industry Applications (INDUSCON), 2010 9th IEEE/IAS International Conference on*. 2010. p. 1-6.

DIGI INTERNATIONAL INC, 2008a, Digi International Inc. [online]. 2008. Available from: <http://www.digi.com/news/pressrelease.jsp?prid=279>.

DIGI INTERNATIONAL INC, 2008b, *XBP24_XB24 XBee® Multipoint RF Modules* [online]. 2008. Available from: http://www.digi.com/pdf/ds_xbeemultipointmodules.pdf

DIGI INTERNATIONAL INC, 2008c, *X-CTU Configuration & Test Utility Software User Guide* [online]. 2008. Available from: http://ftp1.digi.com/support/documentation/90001003_A.pdf

DIGI INTERNATIONAL INC, 2012, *XBee/XBee-PRO® 802.15.4 Professional Kit Getting Started Guide* [online]. 2012. Available from: http://ftp1.digi.com/support/documentation/90002159_A.pdf

ENERGIZER HOLDINGS, INC, 2005, *Energizer Holdings, Inc* [online]. 2005. Available from: <http://data.energizer.com/PDFs/522.pdf>

FAO, 2002, CAPÍTULO 4: CONTROL DEL MEDIO AMBIENTE. [online]. 2002. [Accessed 23 October 2013]. Available from: <http://www.fao.org/docrep/005/s8630s/s8630s06.htm#bm06>

FARAHANI, Shahin, 2011, *ZigBee Wireless Networks and Transceivers*. Newnes. ISBN 9780080558479.

FERRERO, Fernando José, 2006, Lección 6. Fundamentos de los sistemas de medida. [online]. 2006. Available from: <http://www.ate.uniovi.es/5809/Lección06.pdf>

FREESCALE SEMICONDUCTOR, INC, 2007, *MPX5100 - MPXV5100 Series Integrated Silicon Pressure Sensor On-Chip Signal Conditioned, Temperature Compensated and Calibrated* [online]. 2007. Available from: http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MPX5100.pdf?pspll=1

FREESCALE SEMICONDUCTOR, INC, 2010, *MMA7361LC ±1.5g, ±6g Three Axis Low-g Micromachined Accelerometer* [online]. 2010. Available from: http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA7361LC.pdf?pspll=1

FREESCALE SEMICONDUCTOR, 2006, *Introduction to HCS08 Background Debug Mode. AN3335 Application Note* [online]. 2006. Available from: http://www.freescale.com/files/microcontrollers/doc/app_note/AN3335.pdf

FREESCALE SEMICONDUCTOR, 2008a, *8-bit S08 embedded controllers. MC9S08JM16 Fact Sheet* [online]. 2008. Available from: http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/fact_sheet/MC9S08JM16FS.pdf?fps p=1

FREESCALE SEMICONDUCTOR, 2008c, *AN3499 Clock Options on the HC9S08 Family. Application Note* [online]. 2008. Available from: http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/app_note/AN3499.pdf

FREESCALE SEMICONDUCTOR, 2008b, *8-bit S08 embedded controllers. MC9S08JM16 Fact Sheet* [online]. 2008. Available from: http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/fact_sheet/MC9S08JM16FS.pdf?fps p=1

FREESCALE SEMICONDUCTOR, 2008d, *DRM104: SD Card Reader Using the M9S08JM60 Series. Designer Reference Manual* [online]. 2008. Available from: http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/ref_manual/DRM104.pdf?fsrch=1&sr=3

FUTURE TECHNOLOGY DEVICES INTERNATIONAL LTD, 2010, *FT2232D DUAL USB TO SERIAL UART/FIFO IC Datasheet* [online]. 2010. Available from: http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT2232D.pdf

HONGJIANG, He and SHUANGYOU, Wang, 2008, The application of ARM and ZigBee technology wireless networks in monitoring mine safety system. In: *Computing, Communication, Control, and Management, 2008. CCCM'08. ISECS International Colloquium on* [online]. 2008. p. 430–433. [Accessed 24 October 2013]. Available from: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4609721

IACONO, Lucas, GODOY, Pablo, MARIANETTI, Osvaldo and GARCÍA GARINO, Carlos,

2010, Estudio de plataformas de hardware empleadas en redes de sensores inalámbricas. In : *XVI Congreso Argentino de Ciencias de la Computación* [online]. 2010. p. 784–793. [Accessed 25 October 2013]. ISBN 978-950-9474-49-9. Available from: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/19349>

INFOAGRO.COM, 2010, Control climático en invernaderos. 1ª parte. [online]. 2010. [Accessed 23 October 2013]. Available from: http://www.infoagro.com/industria_auxiliar/control_climatico.htm

JIMÉNEZ, Andrés, RAVELO, Dianeth and GÓMEZ, Johana, 2010, Sistema de adquisición, almacenamiento y análisis de información fenológica para el manejo de plagas y enfermedades de un duraznero mediante tecnologías de agricultura de precisión. *Tecnura*. 2010. Vol. 14, no. 27, p. 41–51.

KALAIVANI, T., ALLIRANI, A. and PRIYA, P., 2011, A survey on Zigbee based wireless sensor networks in agriculture. In : *Trendz in Information Sciences and Computing (TISC), 2011 3rd International Conference on* [online]. 2011. p. 85–89. [Accessed 24 October 2013]. Available from: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6169090

KESHTGARI, Manijeh and DELJOO, Amene, 2012, A wireless sensor network solution for precision agriculture based on zigbee technology. *Wireless Sensor Network*. 2012. Vol. 4, no. 1, p. 25–30.

KHAN, Zeashan Hameed, THIRIET, Jean Marc and GENON-CATALOT, Denis, 2009, Wireless network architecture for diagnosis and monitoring applications. In : *Proceedings of the 6th IEEE Conference on Consumer Communications and Networking Conference*. Las Vegas, NV, USA : IEEE Press. 2009. p. 256–257. ISBN 978-1-4244-2308-8.

KOVÁCS, Zoltán Gy, MAROSY, Gábor E. and HORVÁTH, Gyula, 2010, Case study of a simple, low power WSN implementation for forest monitoring. In : *Electronics Conference (BEC), 2010 12th Biennial Baltic* [online]. 2010. p. 161–164. [Accessed 22 October 2013]. Available from: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5629722

LEE, Dal—Hoon, 1993, *Energy saving through integrated greenhouse climate*. Vancouver : UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA.

LI, Wenbin, ZHANG, Junguo, ZHANG, Junmei, XIA, Zhifeng and WANG, Guozhu, 2009, The monitoring of host computer for forest fire detection system based on wireless sensor network. In : *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2009. WiCom'09. 5th International Conference on* [online]. 2009. p. 1–4. [Accessed 24 October 2013]. Available from: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5302195

LONGTIN, Jon, 2008, Wireless Gas Meter Reading: New Technologies. [online]. 2008. [Accessed 24 October 2013]. Available from: http://www.aertc.org/conference/AEC_Sessions%5CCopy%20of%20Session%201%5CTrack%20C%20Networks%20of%20the%20future%5CSmart%20Networks%2011%5C4.%20Dr.%20JonLongtin\Jon Longtin presentation.pdf

MAINWARING, Alan, CULLER, David, POLASTRE, Joseph, SZEWCZYK, Robert and ANDERSON, John, 2002, Wireless sensor networks for habitat monitoring. In : *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications* [online]. 2002. p. 88–97. [Accessed 24 October 2013]. Available from: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=570751>

MAYNÉ, Jordi, 2003, Sensores, acondicionadores y procesadores de señal. *Silica* [online]. 2003. [Accessed 24 October 2013]. Available from: http://www.bairesrobotics.com.ar/data/sensores_2003.pdf

MICROSEMI SEMICONDUCTOR, 2004, *LX1972 Ambient Light Detector* [online]. 2004. Available from: www.microsemi.com/datasheets/lx1972.pdf

MINH VU, Quan, 2011, *Automated Wireless Greenhouse Management System. Master thesis*. 2011. School of engineering and advanced technology, Massey University.

MINMING, Tong, BIN, Liu, JINGJING, Wang, LI, Cai, ZIYUAN, Tong and HAIBO, Dong, 2011, Study on ZigBee wireless sensor network in analyzing gas distribution of coal mining field. In : *Electronic Measurement & Instruments (ICEMI), 2011 10th International Conference on* [online]. 2011. p. 121–124. [Accessed 24 October 2013]. Available from: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6037693

MITZNER, Kraig, 2009, *Complete PCB design using OrCAD Capture and PCB editor*. Oxford, United Kingdom : Newnes by Elsevier Inc.

MORAIS, Raul, FERNANDES, Miguel A, MATOS, Samuel G, SERÔDIO, Carlos, FERREIRA, PJSG and REIS, MJCS, 2008, A ZigBee multi-powered wireless acquisition device for remote sensing applications in precision viticulture. *Computers and electronics in agriculture*. 2008. Vol. 62, no. 2, p. 94–106.

NATIONAL INSTRUMENTS, 2010, Acondicionamiento de Señales Necesario para Medidas de Temperatura - National Instruments. [online]. 2010. [Accessed 24 October 2013]. Available from: <http://www.ni.com/white-paper/11892/es#toc1>

NIKO-SEM, 2001, *L1117 - 1A Fixed and Adjustable Low Dropout Linear Regulator (LDO)* [online]. 2001. Available from: <http://elk.informatik.fh-augsburg.de/da/ma-4/Datasheets/Other/L1117.pdf>

NISKANEN, Ville, AHOLA, Jero and LEHTINEN, Paavo, 2013, Verification of the applicability of an RF-signal-based detection method for partial discharges on inverter-fed random wound stator windings in a low-voltage induction motor. In : *Power Electronics and Applications (EPE), 2013 15th European Conference on* [online]. 2013. p. 1–11. [Accessed 22 October 2013]. Available from: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6631930

NK (NIELSEN-KELLERMAN), 2010, *Manual de instrucciones Para los modelos Kestrel 4500 y Kestrel 4500 NV* [online]. 2010. Available from:

http://www.nkhome.com/pdfs/k4500Span_WEB.pdf;
http://www.nkhome.com/pdfs/k45_web.pdf

ORGANIZACIÓN MUNDIAL METEOROLÓGICA (OMM), 2007, Guía de instrumentos meteorológicos y métodos de observación. [online]. 2007. Available from: <http://www.wmo.ch/pages/prog/www/IMOP/publications/CIMO-Guide/Draft-7-edition.html>

PERDIGONES, A., PERALTA, Ignacio, NONALASCO, J, MUÑOZ, M. A and PASCUAL, V, 2004, Sensores para el control climático en invernadero. *Revista de Horticultura* [online]. 2004. [Accessed 24 October 2013]. Available from: http://www.horticom.com/revistasonline/horticultura/rh179/44_49.pdf

POLASTRE, Joseph, SZEWCZYK, Robert and CULLER, David, 2005, Telos: enabling ultra-low power wireless research. In : *Information Processing in Sensor Networks, 2005. IPSN 2005. Fourth International Symposium on* [online]. 2005. p. 364–369. [Accessed 25 October 2013]. Available from: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1440950

QUAN, Vu Minh, GUPTA, Gourab Sen and MUKHOPADHYAY, Subhas, 2011, Review of sensors for greenhouse climate monitoring. In : *Sensors Applications Symposium (SAS), 2011 IEEE* [online]. 2011. p. 112–118. [Accessed 24 October 2013]. Available from: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5739816

QUIMICAWEB, 2008, EL CALOR Y LA TEMPERATURA. *El calor y la temperatura* [online]. 2008. [Accessed 23 October 2013]. Available from: http://www.quimicaweb.net/grupo_trabajo_ccnn_2/tema3/

RAMOS LARA, Rafael, LÓPEZ GARCÍA, Mariano and CANTÓ-NAVARRO, Enrique, 2009, Entorno Didáctico para Sistemas Digitales de Instrumentación y Control. [online]. 2009. [Accessed 25 October 2013]. Available from: http://petrus.upc.es/emsy/jcra09_rramos_2.pdf

ROSADO MEDINA, José, 2011, *Realización de drivers para LabVIEW*. 2011. Universidad Carlos III de Madrid.

RUIZ-GARCIA, Luis, LUNADEI, Loredana, BARREIRO, Pilar and ROBLA, Ignacio, 2009, A Review of Wireless Sensor Technologies and Applications in Agriculture and Food Industry: State of the Art and Current Trends. *Sensors*. 2009. Vol. 9, no. 6, p. 4728–4750. DOI 10.3390/s90604728.

SÄRKIMÄKI, V., TIAINEN, R., LINDH, T. and AHOLA, J., 2006, Applicability of ZigBee technology to electric motor rotor measurements. In : *Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006. SPEEDAM 2006. International Symposium on*. 2006. p. 137–141.

SENSIRION AG, 2004, *SHT1x/SHT7x Humidity and Temperature sensor v2.02* [online]. 2004. Available from: http://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/Humidity/Sensirion_Humidity_SHT7x_Datasheet_V5.pdf

SENSIRION AG, 2011, Datasheet SHT7x (SHT71, SHT75) Humidity and Temperature Sensor IC. [online]. 2011. [Accessed 24 October 2013]. Available from: http://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/Humidit y/Sensirion_Humidity_SHT7x_Datasheet_V5.pdf

Sensores y acondicionadores, 2010. *Tema 3. Características de funcionamiento y operativas* [online], [Accessed 24 October 2013]. Available from: <http://www.marcombo.com/Descargas/9788426715753/SENSORES/TEMAS/SA%20Te ma%2003-%20Caracteristicas%20de%20funcionamiento%20y%20operativas.pdf>

SHAIKH, Z. A., YOUSUF, H., NAWAZ, F., KIRMANI, M. and KIRAN, S., 2010, Crop irrigation control using wireless sensor and actuator network (wsan). In : *Information and Emerging Technologies (ICIET), 2010 International Conference on* [online]. 2010. p. 1–5. [Accessed 24 October 2013]. Available from: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5625669

SLADE, Mel, JONES, Mark Hedley and SCOTT, Jonathan B., 2011, *Choosing the right microcontroller: A comparison of 8-bit Atmel, Microchip and Freescale MCUs* [online]. Faculty of Engineering, The University of Waikato. [Accessed 25 October 2013]. Available from: <http://researchcommons.waikato.ac.nz/handle/10289/5938>

STOJKOSKA, Biljana and DAVCEV, Danco, 2009, Web Interface for Habitat Monitoring Using Wireless Sensor Network. In : *Wireless and Mobile Communications, 2009. ICWMC'09. Fifth International Conference on* [online]. 2009. p. 157–162. [Accessed 24 October 2013]. Available from: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5279518

TANGIRALA, Phani, 2005, Development and validation of a special purpose sensor and processor system to calculate equilibrium moisture content of wood. [online]. 2005. [Accessed 24 October 2013]. Available from: http://uknowledge.uky.edu/gradschool_theses/256/

TORRES, Adriana and LÓPEZ, Roberto, 2010, Medición de Luz Diaria Integrada en Invernaderos. [online]. 2010. [Accessed 24 October 2013]. Available from: <http://www.extension.purdue.edu/extmedia/HO/HO-238-SW.pdf>

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA, 2003, Tema 11. La Fotosíntesis. [online]. 2003. [Accessed 24 October 2013]. Available from: http://www.euita.upv.es/varios/biologia/Temas/tema_11.htm

UVA.ES, 2010, SENSORES: fundamento y características. [online]. 2010. [Accessed 24 October 2013]. Available from: http://www.ele.uva.es/~lourdes/docencia/Master_IE/Sensores.pdf

WANG, Xin, MA, Longquan and YANG, Huizhong, 2011, Online Water Monitoring System Based on ZigBee and GPRS. *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 15, no. 0, p. 2680–2684. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2011.08.504>.

XIAO, Lei and GUO, Lejiang, 2010, The realization of precision agriculture monitoring

system based on wireless sensor network. In : *Computer and Communication Technologies in Agriculture Engineering (CCTAE), 2010 International Conference On*. 2010. p. 89–92.

ZHOU, Yiming, YANG, Xianglong, WANG, Liren and YING, Yibin, 2009, A wireless design of low-cost irrigation system using ZigBee technology. In : *Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing, 2009. NSWCTC'09. International Conference on* [online]. 2009. p. 572–575. [Accessed 24 October 2013]. Available from: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4908331

