ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

CONSTRUCCIÓN DE UNA RED ZIGBEE PROTOTIPO PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS DESDE TRANSMISORES DE CORRIENTE DE DOS HILOS

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TITULO DE INGENIERO EN ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES

Luisco5049@yahoo.com

CYNTHIA VANESSA MORENO PALLO
cynthi.sun@gmail.com

DIRECTOR: DR. LUIS CORRALES

Quito, Marzo del 2009

DECLARACIÓN

Yo, Moreno Pallo Cynthia Vanessa, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Cynthia Vanessa Moreno Pallo

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Cynthia Vanessa Moreno Pallo, bajo mi supervisión.

Dr. Luis Corrales
DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

El presente Proyecto de titulación no hubiese sido posible sin la colaboración y el apoyo de aquellas personas que se interesaron en el mismo y a quienes van dedicadas estas líneas.

Agradezco a Dios por otorgarme el preciado don de la vida y permitirme día a día luchar por conseguir mis objetivos; agradezco principalmente a mi familia por luchar junto a mí en todo momento con el objetivo de ver concluido este Proyecto.

Mi agradecimiento en especial al Dr. Luis Corrales, pues su apoyo resulto fundamental en el desarrollo del Proyecto, además de demostrar ser más que un verdadero amigo y consejero.

Importantes agradecimientos a mis amigos y compañeros de toda la vida, aquellos que en las horas de estudio en la Carrera fueron un apoyo fundamental y junto a ellos conseguimos sacar adelante nuestros sueños para verlos culminados poco a poco, gracias mis queridos amigos.

CONTENIDO

CAPÍTULO I 1

ESTUDIO DEL PROTOCOLO ZIGBEE Y DE LOS TRANSMISORES DE CORRIENTE DE DOS HILOS 1

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROTOCOLO ZIGBEE 2
1.1.1 TIPOS DE DISPOSITIVOS ZIGBEE] 3
1.1.2 TOPOLOGÌAS DE LAS REDES ZIGBEE 4

1.2 TIPOS DE TRÁFICO SOPORTADO POR ZIGBEE 5
1.2.1 TRÁFICO PERIÓDICO 6
1.2.2 TRÁFICO INTERMITENTE 6

1.3 ARQUITECTURA ZIGBEE 6

1.4 TIPOS DE TRAMAS Y DIRECCIONAMIENTO EN LA RED ZIGBEE 8

1.5 FORMACIÓN DE LA RED ZIGBEE 10

1.6 TERMINOLOGÍA ZIGBEE A NIVEL APLICACIÓN 11
1.6.1 PERFIL (Profile) 11
1.6.2 DESCRIPTOR DE DISPOSITIVO (Device Description) 12
1.6.3 OBJETO (Endpoint) *12*
1.6.4 ATRIBUTO (Atribute) 12

1.7 APLICACIONES ZIGBEE 12

1.8 COMPARACIÓN CON OTRAS TECNOLOGIAS 13

1.9 TRANSMISORES DE CORRIENTE DE DOS HILOS 15
1.9.1 LAZO ANALÓGICO DE CORRIENTE 4-20mA 17
1.9.1.1 Transmisores de dos hilos 18

CAPÍTULO II 19

DISEÑO DE LA RED ZIGBEE 19

2.1 INTRODUCCIÓN 19
2.1.1 REDES DE CAMPO INDUSTRIALES *19*

2.2 DESCRIPCIÓN DELPROTOTIPO A IMPLEMENTARSE 20
2.2.1 GENERALIDADES 21
2.2.2 DESCRIPCIÓN DEL TRÁFICO DEL PROTOTIPO 22
2.2.3 TOPOLOGÍA 23

2.3 PROCEDIMIENTO GENERAL DE LA ADQUISICIÓN DE DATOS 23

2.4 DISEÑO DEL HARDWARE 24
2.4.1 FUNCIONES DEL HARDWARE 24
2.4.2 SELECCIÓN DE COMPONENTES BÁSICOS EN LOS NODOS ZIGBEE 24
2.4.2.1 Selección del microcontrolador PIC 25
2.4.2.2 Transceiver RF 26

2.4.3 COMPONENTES DEL COORDINADOR DEL PROTOTIPO DE ADQUISICIÓN DE DATOS ... 27
2.4.3.1 Descripción de los componentes del nodo coordinador ZigBee 28
2.4.3.1.1 Comunicación serial 28
2.4.3.1.2 Módulo XBee-PRO 28

2.4.4 COMPONENTES DE LOS NODOS TERMINALES/ESCLAVOS DEL PROTOTIPO DE ADQUISICIÒN DE DATOS 30
2.4.4.1 Descripción de los componentes de los nodos terminales ZigBee 31
2.4.4.1.1 Acondicionamiento de entrada al microcontrolador PIC 31
2.4.4.1.2 Microcontrolador PIC16F877 32
2.4.4.1.3 Módulo XBee-PRO 33
2.4.4.1.4 Display LCD [11] 33

2.5 PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN 34

CAPÍTULO III **36**

CONSTRUCCIÓN DEL HARDWARE Y DESARROLLO DEL SOFTWARE **36**

3.1 PARTES FUNDAMENTALES DEL PROTOTIPO 36

3.2 DESCRIPCIÓN DE LOS SENSORES UTILIZADOS PARA EL PROTOTIPO 37
3.2.1 SENSOR DE TEMPERATURA 37
3.2.1.1 Descripción del sensor de temperatura 37
3.2.1.1.1 Termocupla tipo K 37
3.2.1.1.2 Amplificador AD595AQ 38
3.2.1.1.3 Parámetros considerados en la medición de la temperatura 39

3.2.2 SENSOR DE HUMEDAD 40
3.2.2.1 Descripción del sensor de humedad 40
3.2.2.1.1 Sensor de humedad HIH-3610 [15] 41
3.2.2.1.2 Parámetros considerados en la medición de la humedad relativa 42

3.3 DIAGRAMAS CIRCUITALES 44

3.4 TARJETAS CONSTRUÍDAS 48
3.4.1 SUMINISTRO Y CONSUMO DE ENERGÍA PARA EL PROTOTIPO 49

3.5 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SOFTWARE DEL PROTOTIPO 50

3.6 DESCRIPCIÓN DEL PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN 51
3.6.1 TRAMA DE INFORMACIÓN DE PC A MÓDULO REMOTO 51

3.6.2 TRAMA DE INFORMACIÓN DE MÓDULO REMOTO A PC 52

3.7 DESARROLLO DE LA INTERFACE HOMBRE MÁQUINA 52
3.7.1 DESCRIPCIÓN DE LA APLICACIÓN DEL HOST 52
3.7.2 DESCRIPCIÓN DEL HMI 53

3.8 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE REALIZADO 59
3.8.1 PROGRAMA PRINCIPAL DEL COMPUTADOR 59
3.8.2 PROGRAMA PRINCIPAL DEL MICROCONTROLADOR 16F877 61

3.9 REFERENCIA DE LOS COSTOS DEL PROTOTIPO 63

CAPÍTULO IV 65

PRUEBAS DEL PROTOTIPO 65

4.1 IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO 65

4.2 PRUEBAS DE CONECTIVIDAD DEL PROTOTIPO 69
4.2.1 DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS Y RESULTADOS 69
4.2.1.1 Escenario 1: Campo Abierto 69
4.2.1.2 Escenario 2: Rango de alcance con obstáculos 72
4.2.1.3 Escenario 3: Calidad del enlace con interferencia de dispositivos a la misma frecuencia de operación 73

CAPÍTULO V 75

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 75

5.1 CONCLUSIONES 75
5.1.1 PROTOTIPO DE ADQUISICIÓN DE DATOS 75
5.1.2 TECNOLOGIA ZIGBEE/IEEE 802.15.4 75
5.1.3 HARDWARE 75
5.1.4 SOFTWARE 76
5.1.5 GENERAL 76

5.2 RECOMENDACIONES 78

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 80

ANEXOS ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

ANEXO A DIAGRAMAS DEL ESQUEMA RUTEADO DE LAS TARJETAS CONSTRUÍDAS

ANEXO B MANUAL DE CONEXIÓN DEL PROTOTIPO CONSTRUÍDO

ANEXO C **MANUAL DE USUARIO**

ANEXO D **DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA DEL MICROCONTROLADOR PIC**

ANEXO E **DATASHEET DEL MÓDULO XBEE- PRO**

ANEXO F **AMPLIFICADOR AD595**

ANEXO G **TRANSMISOR AD694**

ANEXO H **SENSOR DE HUMEDAD HIH3610**

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 POSIBLE POSICIÓN DE LOS DISPOSITIVOS ZIGBEE EN LAS DIFERENTES TOPOLOGÍAS DE RED 3
FIGURA 1.2 DIFERENTES TOPOLOGÍAS DE RED DISPONIBLES EN ZIGBEE 5
FIGURA 1.3 DIFERENTES CAPAS QUE CONFORMAN LA PILA DE PROTOCOLOS PARA ZIGBEE 6
FIGURA 1.4 CAMPOS DE LOS CUATRO TIPOS DE TRAMAS BÁSICAS DE ZIGBEE 9
FIGURA 1.5 DIVERSOS GRUPOS DE APLICACIONES PARA ZIGBEE 13
FIGURA 1.6 COMPARACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS ZIGBEE, BLUETOOTH Y WI-FI 14
FIGURA 1.7 TRASMISOR DE CORRIENTE 16
FIGURA 1.8 CORRIENTE VERSUS TEMPERATURA 17
FIGURA 2.1 REPRESENTACIÓN DEL PROYECTO 21
FIGURA 2.2 TIPOS DE XBEE-PRO 26
FIGURA 2.3 COMPONENTES DEL NODO COORDINADOR 27
FIGURA 2.4 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL NODO COORDINADOR 19
FIGURA 2.5 COMPONENTES DEL TERMINAL DE ADQUISICIÓN DE DATOS 30
FIGURA 2.6 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL NODO TERMINAL 19
FIGURA 2.7 CONEXIONES A LAS LÍNEAS DE ENTRADA/SALIDA DEL PIC 32
FIGURA 2.8 PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN 34
FIGURA 3.1 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL SENSOR DE TEMPERATURA 37
FIGURA 3.2 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL SENSOR DE HUMEDAD 41
FIGURA 3.3 CARACTERÍSTICAS DEL SENSOR HIH-3610 41
FIGURA 3.4 AMPLIFICADOR DIFERENCIAL 42
FIGURA 3.5 DIAGRAMA CIRCUITAL DEL NODO COORDINADOR 45
FIGURA 3.6 DIAGRAMA CIRCUITAL DEL NODO TERMINAL 46
FIGURA 3.7 DIAGRAMA CIRCUITAL DEL SENSOR DE TEMPERATURA 47
FIGURA 3.8 DIAGRAMA CIRCUITAL DEL SENSOR DE HUMEDAD 47
FIGURA 3.9 TARJETAS DE LOS MÓDULOS XBEE 48
FIGURA 3.10 SENSOR DE TEMPERATURA 48
FIGURA 3.11 SENSOR DE HUMEDAD 49
FIGURA 3.12 PANTALLA PRINCIPAL DE LA APLICACIÓN 54
FIGURA 3.13 PANTALLA DE CONFIGURACIÓN BÁSICA DEL MÓDULO 55
FIGURA 3.14 PANTALLA DE CONFIGURACIÓN AVANZADA DEL MÓDULO 56
FIGURA 3.15 PANTALLA DE VISUALIZACIÓN DE LA TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA 57
FIGURA 3.16 PANTALLA DE VISUALIZACIÓN DE LOS VALORES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA ADQUIRIDOS 58
FIGURA 3.17 ESQUEMA GENERAL DEL PROGRAMA DEL COMPUTADOR 59
FIGURA 3.18 DIAGRAMA DE FLUJO SIMPLIFICADO DEL MICROCONTROLADOR 61
FIGURA 4.1 PROTOTIPO ARMADO PARA REALIZAR LAS PRUEBAS 66
FIGURA 4.2 ESQUEMA GENERAL DE LA RED A FORMARSE 66
FIGURA 4.3 CONFIGURACIÓN DE LOS MÓDULOS Y LECTURA DE LOS VALORES ADQUIRIDOS 68
FIGURA 4.4 ERRORES CALCULADOS 71
FIGURA 4.4 MÓDULO CON INTERFERENCIAS 74

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1 COMPONENTES DEL NODO COORDINADOR 30
TABLA 2.2 COMPONENTES DEL NODO TERMINAL 33
TABLA 3.1 RANGOS DE TEMPERATURA DE TERMOCUPLAS 38
TABLA 3.2 RANGOS PRE CALIBRADOS PARA EL AD694 39
TABLA 3.3 COMPONENTES DEL SENSOR DE TEMPERATURA 40
TABLA 3.4 COMPONENTES DE LA TARJETA DEL SENSOR DE HUMEDAD 44
TABLA 3.5 COSTO DEL PROTOTIPO CONSTRUIDO 63

RESUMEN

El objetivo de este proyecto fue desarrollar un prototipo para la adquisición de datos sobre ZigBee que es un protocolo basado en el estándar IEEE 802.15.4.
ZigBee fue concebido como una tecnología ideal para procesos de automatización. El no utilizar cables dentro de una red facilita el hecho del montaje de la misma, además ayuda en el ahorro de tiempo y dinero, en comparación con tecnologías cableadas, en las cuáles puede resultar tedioso la tendida de alambres.

Tomando como punto de partida estos detalles, se construyó un prototipo para una aplicación industrial en la que se busca medir y controlar la temperatura y humedad relativa del ambiente con el fin de (si así lo requiera el usuario) manejar dichas variables para fines más detallados.

Para resolver este problema se investigó el estándar para determinar sus características e identificar aquellas relacionadas con el transporte de información desde sensores. Luego se hizo la importación de módulos de demostración IEEE 802.15.4 y se los configuró en concordancia con la aplicación que se desarrolló para probar los enlaces inalámbricos.
Pruebas que se realizaron para evaluar en forma total este proyecto resultaron bastante satisfactorias. Se pudo comprobar que ZigBee proporciona un alcance de hasta 70 metros a campo abierto y con línea de vista, 50 metros en un ambiente interior con línea de vista y 20 metros en un ambiente interior sin línea de vista.

PRESENTACIÓN

La investigación y desarrollo de nuevas tecnologías han hecho posible la implementación de una novedosa aplicación para mejorar y asegurar la transmisión y tratamiento de los datos durante un proceso de adquisición desde transmisores de corriente de dos hilos, mediante el uso de la tecnología ZigBee. ZigBee puede contribuir notables avances por el hecho de ser una tecnología inalámbrica, lo cual ahorraría tiempo y dinero en cuanto al cableado.

El presente Proyecto de Titulación contribuye al estudio del estándar ZigBee y a la búsqueda de nuevas aplicaciones para el mismo.

En el Primer Capítulo se describe el estándar ZigBee, sus conceptos básicos, topologías de red, velocidades de transmisión, capas del estándar, perfiles, direccionamiento, aplicaciones, etc.; esta parte del capítulo ayuda a comprender al lector cómo trabaja el estándar y para qué sirve. Por otra parte se hace una comparación con otros estándares inalámbricos (tales como Bluetooth o Wi-Fi). Por su importancia y relevancia para el proyecto se describe también los transmisores de corriente de dos hilos utilizados en la industria.

En el Segundo Capítulo se aborda el Diseño de la Red ZigBee y se hace la selección del hardware para desarrollar este proyecto. Se describe los componentes básicos en los nodos ZigBee (microncontrolador PIC, módulo de RF). Se justifica los pasos

seguidos en el diseño y se describe el protocolo de comunicación utilizado por el módulo para la transferencia de datos.

El Tercer Capítulo corresponde a la construcción del prototipo en sí; en este capítulo se describen los elementos que participan en el hardware (sensores, transmisores de corriente, entre otros.) y los parámetros considerados en la medición de la temperatura y la humedad. Luego se describe el desarrollo del software a utilizar tanto en los módulos como en el computador, para la transmisión, tratamiento y control de los datos del prototipo de adquisición de datos. A continuación se detalla la manera cómo trabaja la aplicación del Host que sirve como interfaz entre el usuario y el prototipo. Finalmente se proporcionan los costos para poder implementar el prototipo construido.

En el Cuarto Capítulo, se efectuaron las pruebas sobre diferentes escenarios, se describe los resultados tanto en el rango de alcance como en la interferencia de y para otros dispositivos que operan en la misma banda. Una vez realizadas dichas pruebas, se analizaron los resultados obtenidos.

En el último Capítulo, se encuentran detalladas las conclusiones que se pudieron obtener del presente Proyecto, así como recomendaciones válidas para los lectores y que se obtuvieron de las diferentes experiencias obtenidas en el desarrollo de este proyecto.

CAPÍTULO I

ESTUDIO DEL PROTOCOLO ZIGBEE Y DE LOS TRANSMISORES DE CORRIENTE DE DOS HILOS

CAPÍTULO I

ESTUDIO DEL PROTOCOLO ZIGBEE Y DE LOS TRANSMISORES DE CORRIENTE DE DOS HILOS

Las redes ZigBee comenzaron a concebirse por el año 1998, cuando muchos ingenieros, al crear Wi-Fi y Bluetooth, observaron que estos dos estándares resultaban inadecuados para cierto tipo de aplicaciones. Por otro lado, hasta hace pocos años no existía un estándar inalámbrico dedicado a sensores y dispositivos de control. Dichos dispositivos no requieren un gran ancho de banda pero necesitan sobretodo una baja latencia y, para ciertos trabajos, bajo consumo de energía para lograr una duración de las baterías más larga y arreglos con un mayor número de dispositivos.

Hoy en día existen soluciones creadas por diferentes fabricantes para cumplir con estos requerimientos, pero debido a la falta de un estándar abierto, se estaba y se está enfrentando un problema de interoperabilidad entre ellas. Por este motivo, un gran número de empresas fabricantes han formado una alianza con el objeto de promover un estándar global y abierto para redes de sensores y control.

ZigBee es una alianza tecnológica, sin fines de lucro, conformada por más de 100 empresas, la mayoría de ellas fabricantes de semiconductores, con el objeto de auspiciar el desarrollo e implementación de una tecnología inalámbrica de área personal a bajo costo.

ZigBee Alliance recurrió el estándar IEEE 802.15.4 como base para desarrollar las capas inferiores del protocolo ZigBee, permitiendo utilizar una topología de red tan variada como el número de aplicaciones, incluyendo además características de seguridad.

ZigBee ha sido diseñado para soportar un diverso mercado de aplicaciones, el estándar atiende a un segmento del mercado no atendido por los otros

estándares existentes, con baja tasa de transmisión de datos, bajo ciclo de servicio de conectividad y bajo costo.

El objetivo del presente proyecto es construir un prototipo que permita, mediante una red ZigBee, capturar la información proporcionada por transmisores de corriente de dos hilos y mostrarlos en un computador personal.

Este capítulo describe las características del protocolo ZigBee/IEEE 802.15.4. Se presenta su arquitectura, topologías, formato de la trama, tipos de tráfico soportados, elementos de red y sus posibles áreas de aplicación. Se establece además diferencias con otras tecnologías inalámbricas (Bluetooth y Wi-Fi).

Por su importancia y relevancia para el proyecto se describirá también los transmisores de corriente de dos hilos utilizados en la industria.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROTOCOLO ZIGBEE [1]

El protocolo ZigBee/ IEEE 802.15.4 ofrece las siguientes características:

1. Estándar para comunicación de datos a corto alcance, basado en la especificación IEEE 802.15.4 para redes de área personal.
2. ZigBee opera en las bandas libres ISM (Industrial, Scientific & Medical) de 2.4 GHz, 868 (Europa) y 915 MHz (Estados Unidos).
3. Tiene una velocidad de transmisión de 250kbps y un rango de cobertura de 10 a 75 metros.
4. Utiliza la tecnología Secuencia Directa de Espectro Ensanchado (DSSS).
5. Topología Maestro/Esclavo.
6. Hasta 65,536 nodos por red, 255 por subred.
7. Control de acceso al medio CSMA-CA.
8. Bajo consumo de energía.
9. Bajo costo de los dispositivos, instalación y mantenimiento de la red.

1.1.1 TIPOS DE DISPOSITIVOS ZIGBEE [2]

ZigBee Alliance define tres tipos diferentes de dispositivos ZigBee según el papel que cumplen en la red:

Coordinador ZigBee. El tipo de dispositivo más completo. Existe uno por red, independientemente de la topología utilizada. Inicia la formación de la red y selecciona la frecuencia del canal a ser usado. Es el responsable de la asociación y desasociación de dispositivos.

Router ZigBee. Interconecta dispositivos separados en la topología de la red. Puede actuar como coordinador. Se asocia con el coordinador de la red o con otro router ZigBee. Es capaz de enrutar mensajes entre dispositivos y soportar asociaciones. El router no puede estar en estado de sleep.

Terminal o Dispositivo final. Posee la funcionalidad necesaria para comunicarse con su nodo padre (el coordinador o un router), pero no puede transmitir información destinada a otros dispositivos. De esta forma, este tipo de nodo puede estar dormido la mayor parte del tiempo, aumentando la vida media de sus baterías. Tiene requerimientos mínimos de memoria y es por tanto significativamente más barato. Los dispositivos finales están siempre localizados en los extremos de la red como se ilustra en la Figura 1.1.

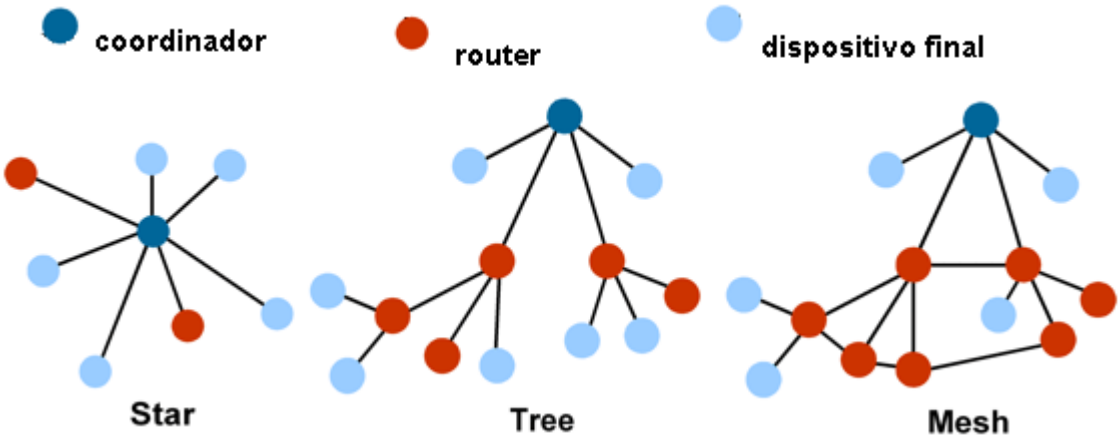


Figura 1.1 Posible posición de los dispositivos ZigBee en las diferentes topologías de red

En base a su funcionalidad puede plantearse una segunda clasificación:

Dispositivo de funcionalidad completa (FFD): se apoya en las funciones y características del estándar IEEE 802.15.4. Gracias a la memoria adicional y a la capacidad de computar, puede funcionar como coordinador o router, o puede ser usado en dispositivos de red que actúen de interface con los usuarios (dispositivo final).

Dispositivo de funcionalidad reducida (RFD): opera con la mínima implementación del protocolo IEEE 802.15.4, tiene capacidad y funcionalidad limitadas, con el objetivo de conseguir un bajo coste y una gran simplicidad. Además solo pueden asociarse a un FFD a la vez.

Los FFDs utilizan cualquier topología y son capaces de comunicarse con cualquier otro dispositivo. Los RFD están limitados a utilizar la topología estrella, no pueden ser ni coordinadores ni ruteadores, sólo son capaces de comunicarse con el coordinador de la red. Su implementación es sencilla requiriendo de dispositivos de poca memoria y bajo costo. Pueden operar únicamente como terminales.

1.1.2 TOPOLOGÌAS DE LAS REDES ZIGBEE [3]

En ZigBee existen tres tipos de topologías: estrella, árbol, y en red mallada (mesh network), las cuales pueden observarse en la Figura 1.2.

Siempre hay un nodo de red que asume el papel de coordinador central encargado de centralizar la adquisición y las rutas de comunicación entre dispositivos. Además, si se aplica el concepto de Mesh Network, pueden existir coordinadores o ruteadores, alimentados permanentemente en espera de recibir/repetir las tramas de los dispositivos o sensores. Ambos dispositivos son del tipo FFD.

Los dispositivos que hacen la función de sensores, termostatos o mandos a distancia son de funcionalidad reducida RFD, y son alimentados por baterías o pilas.

Sin lugar a dudas, una de las mayores aportaciones del ZigBee, y el que mayor interés está despertando a las empresas desarrolladoras de productos, es el concepto de red nodal o mesh network por el que cualquier dispositivo ZigBee puede conectarse con otro dispositivo, usando a varios de sus compañeros como repetidores. A este se le conoce como enrutado “multi-salto”, primero hace llegar la información al nodo ZigBee vecino, el cual puede además ser coordinador de la red, para así llegar al nodo destino, pasando por todos los que sean necesarios. De esta manera cualquier nodo ZigBee puede hacer llegar los datos a cualquier parte de la red inalámbrica, siempre y cuando todos los dispositivos tengan un vecino dentro de su rango de cobertura.

Las ventajas de esta topología son la baja latencia y la alta confiabilidad. A cambio, se requiere mayor memoria de programa y datos en un dispositivo para soportarlo.

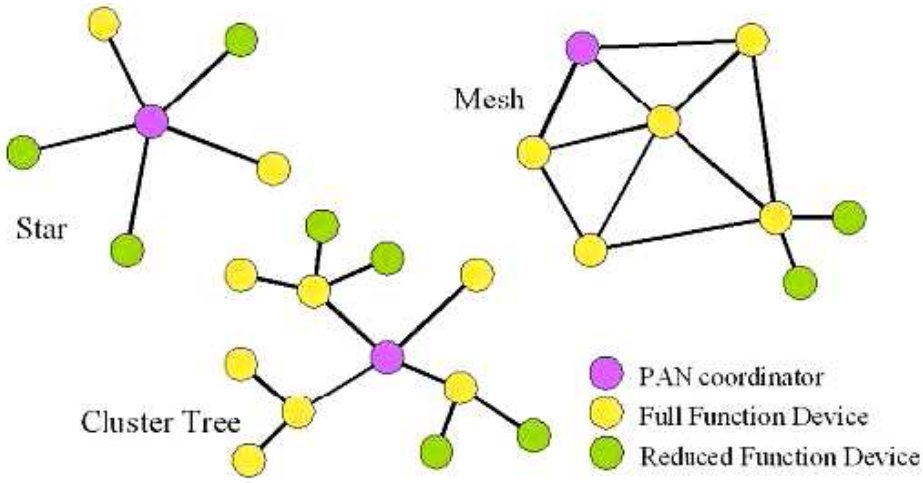


Figura 1.2 Diferentes topologías de red disponibles en ZigBee

1.2 TIPOS DE TRÁFICO SOPORTADO POR ZIGBEE [4]

ZigBee soporta dos tipos de tráfico de datos que pueden ser utilizados de acuerdo a la aplicación:

1.2.1 TRÁFICO PERIÓDICO

Necesario para aplicaciones donde se envían y/o reciben datos transcurrido un lapso constante de tiempo, como es el caso de sistemas que utilizan sensores (control de temperatura, humedad, consumo de energía, etc.) en los cuales se necesita medir de forma constante la variable a controlar.

1.2.2 TRÁFICO INTERMITENTE

Diseñado para aplicaciones que envían y reciben datos cuando son estimulados por una señal externa, como es el caso de un interruptor o conmutador y las alarmas.

1.3 ARQUITECTURA ZIGBEE [5]

ZigBee es una pila de protocolos, que de manera similar al modelo OSI esta constituido por diferentes capas, las cuales son independientes una de la otra. En la Figura 1.3 se muestran las diferentes capas que conforman la pila de protocolos para ZigBee.

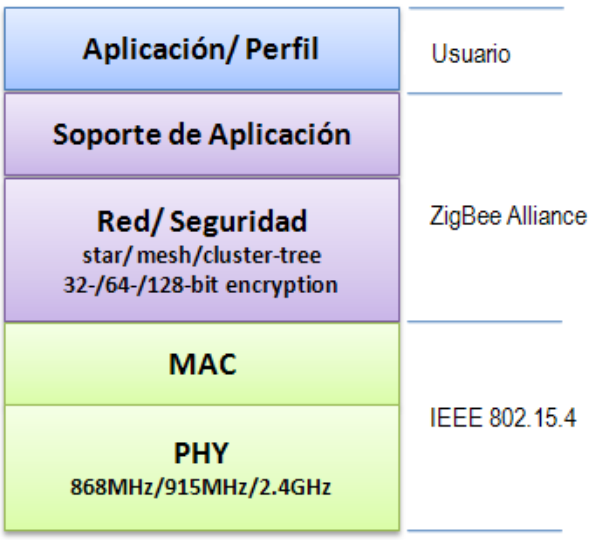


Figura 1.3 Diferentes capas que conforman la pila de protocolos para ZigBee

- 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 esta descritas en el estándar IEEE 802.15.4.

  El estándar trabaja sobre las bandas ISM de uso no regulado, dónde se definen hasta 16 canales en el rango de 2.4 GHz, cada una de ellas con un ancho de banda de 5 MHz. Se utilizan radios con un espectro de dispersión de secuencia directa, lográndose tasas de transmisión en el aire de hasta 250 Kbps en rangos que oscilan entre los 10 y 75 m, los cuales dependen bastante del entorno.

- La **capa de red (NWK)** tiene como objetivo principal permitir el correcto uso del subnivel MAC y ofrecer una interfaz adecuada para su uso por parte de la capa de aplicación. En esta capa se brindan los métodos necesarios para: 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. Cuando esta capa se encuentra cumpliendo la función de unir o separar dispositivos a través del controlador de red, implementa seguridad, y encamina tramas a sus respectivos destinos; además, la capa de red del controlador de red es responsable de crear una nueva red y asignar direcciones a los dispositivos de la misma.

  Es en esta capa en donde se implementan las distintas topologías de red que ZigBee soporta (árbol, estrella y mesh network).

- La siguiente **capa es la de soporte a la aplicación** que es la responsable de mantener el rol que el nodo juega en la red, filtrar paquetes a nivel de aplicación, mantener la relación de grupos y dispositivos con los que la aplicación interactúa y simplificar el envío de datos a los diferentes nodos de la red. La capa de Red y de soporte a la aplicación son definidas por la ZigBee Alliance.

- En el nivel conceptual más alto se encuentra la **capa de aplicación** que no es otra cosa que la aplicación misma y de la que se encargan los fabricantes. Es en esta capa donde se encuentran los ZDO (ZigBee Device Objects) que se encargan de definir el papel del dispositivo en la red, si el actuará como coordinador, ruteador o dispositivo final; y los objetos de aplicación definidos por cada uno de los fabricantes.

Cada capa se comunica con sus capas subyacentes a través de una interface de datos y otra de control, las capas superiores solicitan servicios a las capas inferiores, y éstas reportan sus resultados a las superiores.

1.4 TIPOS DE TRAMAS Y DIRECCIONAMIENTO EN LA RED ZIGBEE [6]

En ZigBee se distinguen cuatro tipos diferentes de tramas básicas. En la Figura 1.4 se muestra los campos de estas tramas.

La **trama de datos** tiene una carga de datos de hasta 104 bytes. La trama esta numerada para asegurar que todos sus bytes llegan a su destino. Un campo nos asegura que la trama se ha recibido sin errores. Esta estructura aumenta la fiabilidad en condiciones complicadas de transmisión.

La estructura de la **trama ACK**, llamada también trama de reconocimiento, es dónde se realiza una realimentación desde el receptor al emisor, de esta manera se confirma que la trama se ha recibido sin errores. Se puede incluir un tiempo de silencio entre tramas, para enviar un pequeño paquete después de la transmisión de cada paquete.

La **trama de comandos y configuración**, se utiliza para el control remoto y la configuración de dispositivos/nodos. Una red centralizada utiliza este tipo de tramas para configurar la red a distancia.

La **trama baliza** (beacon) se encarga de “despertar” los dispositivos que “escuchan” y luego vuelven a “dormirse” si no reciben nada más. Estas tramas son importantes para mantener todos los dispositivos y los nodos sincronizados, sin tener que gastar una gran cantidad de batería estando todo el tiempo encendidos.

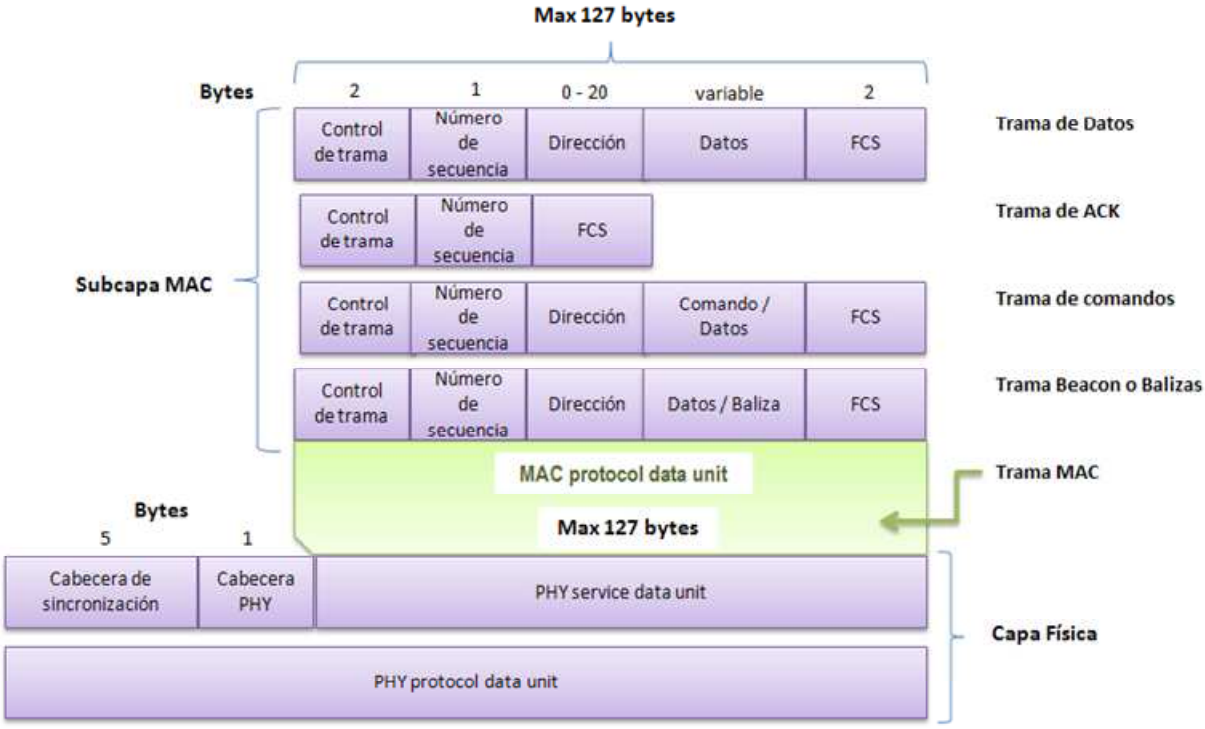


Figura 1.4 Campos de los cuatro tipos de tramas básicas de ZigBee [6]

Los dispositivos se direccionan empleando 64-bits y un direccionamiento corto opcional de 16 bits. El campo de dirección incluido en MAC puede contener información de direccionamiento de ambos orígenes y destinos (necesarios para operar punto a punto). Este doble direccionamiento es usado para prevenir un fallo dentro de la red.

Los dos mecanismos de acceso al canal que se implementan en ZigBee corresponden para redes *“con balizas”* y *“sin balizas”.* Para una red *“sin balizas”,* el estándar CSMA-CA envía reconocimientos positivos para paquetes recibidos correctamente. En esta red, cada dispositivo es autónomo, pudiendo iniciar una conversación, en la cual los otros pueden interferir. A veces, puede ocurrir que el dispositivo destino puede no oír la petición, o que el canal esté ocupado.

Este sistema se usa típicamente en los sistemas de seguridad, en los cuales sus dispositivos (sensores, detectores de movimiento o de rotura de cristales), duermen prácticamente todo el tiempo (el 99,999%). Para que se les tenga en cuenta, estos elementos se *"despiertan"* de forma regular para anunciar que siguen en la red. Cuando se produce un evento, el sensor *"despierta"* instantáneamente y transmite la alarma correspondiente. Es en ese momento cuando el coordinador de red, recibe el mensaje enviado por el sensor, y activa la alarma correspondiente. En este caso, el coordinador de red se alimenta de la red principal durante todo el tiempo.

En cambio, en una red *"con balizas",* se usa una estructura de *supertrama* para controlar el acceso al canal, esta *supertrama* es estudiada por el coordinador de red para transmitir *"tramas baliza"* cada ciertos intervalos. Esta estructura garantiza el ancho de banda dedicado y bajo consumo. Este modo es más recomendable cuando el coordinador de red trabaja con una batería. Los dispositivos que conforman la red, escuchan a dicho coordinador durante el *"balizamiento"* (envío de mensajes a todos los dispositivos –broadcast-). Un dispositivo que quiera intervenir, lo primero que tendrá que hacer es registrarse para el coordinador, y es entonces cuando mira si hay mensajes para él. En el caso de que no haya mensajes, este dispositivo vuelve a *"dormir",* y se despierta de acuerdo a un horario que ha establecido previamente el coordinador. En cuanto el coordinador termina el *"balizamiento",* vuelve a "dormirse".

La supertrama permite el uso de slots de tiempo para tráfico repetitivo. Está dividida en una parte inactiva y otra activa; en la primera todas las estaciones están en estado de reposo, en la segunda el tiempo está dividido en 16 slots que pueden asignarse en dos grupos: uno para período libre de contención y otro para acceso con contención.

1.5 FORMACIÓN DE LA RED ZIGBEE [4]

Una nueva red ZigBee es establecida por un coordinador. Al inicializarse, el coordinador busca otros coordinadores en sus canales permitidos. Basado en la

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

Los distintos dispositivos guardan información acerca de otros nodos de la red, en un área no volátil de memoria llamada tabla de vecindades. Al inicializarse, si un dispositivo determina a través de la tabla que fue parte de una red, puede ejecutar un procedimiento de notificación para localizarla. Los dispositivos (coordinadores o ruteadores) que reciban la notificación, verificarán sus tablas para cerciorarse de que el nuevo dispositivo pertenecía a su red. Si la notificación falla o el dispositivo no se encuentra en las tablas de vecindad del resto, tratará de unirse a una de las redes como un nuevo dispositivo.
Una vez en la red, un dispositivo puede desasociarse ya sea por pedido del coordinador o router (dispositivos padres) o por sí mismo.

1.6 TERMINOLOGÍA ZIGBEE A NIVEL APLICACIÓN

Existen varios conceptos definidos a nivel de la capa aplicación que se deben conocer para realizar el diseño de una red ZigBee, entre los cuales podemos citar:

1.6.1 PERFIL (Profile)

Los perfiles son acuerdos a los que se llega por mensajes; son desarrollados por cada uno de los fabricantes ZigBee, que en base a las necesidades que existen en el mercado, proporcionan soluciones tecnológicas específicas. Los perfiles por tanto tratan de unificar la tecnología con las necesidades del mercado.
Se usan para definir la capacidad de aplicación de un dispositivo y manejar los detalles de la aplicación. Un ejemplo de un perfil sería el control de iluminación de una casa.

1.6.2 DESCRIPTOR DE DISPOSITIVO (Device Description)

Es la delineación de la función de dispositivos específicos dentro de un segmento del profile. Por ejemplo en el perfil de “control de iluminación”, lámparas, switches y otros dispositivos tienen cada uno su descriptor.

1.6.3 OBJETO (Endpoint)

Es un elemento particular dentro de un dispositivo. Cada dispositivo ZigBee dispone de una única dirección de red, por lo tanto se requiere de una dirección de “endpoint” que diferencie cada componente (interruptores, lámparas, sensores, etc.). Cada dispositivo ZigBee puede soportar hasta 240 de tales componentes. El endpoint 0 está reservado para la administración del dispositivo.

1.6.4 ATRIBUTO (Atribute)

Es una entidad de datos que representa una cantidad física o un estado. El dato es comunicado a otro utilizando comandos (los más conocidos set, get, event).
Cada dato que pasa entre los dispositivos de una red ZigBee se llama atributo.

1.7 APLICACIONES ZIGBEE [2]

Las soluciones sobre el estándar ZigBee, en conexión de redes, se centran en mercados y aplicaciones específicas. El estándar ZigBee se ha hecho a medida para la monitorización y para aplicaciones de control. Por lo tanto, los mercados como la automatización de edificios y hogares, la atención sanitaria, control industrial, control de alumbrado y control comercial, son los principales campos de aplicación.

El estándar ZigBee ha sido diseñado para satisfacer las necesidades de este tipo de mercado. Los circuitos integrados para el diseño en ZigBee buscan ser económicos, sencillos y además brindar escalabilidad con el fin de facilitar la comercialización de productos a gran escala.

Figura 1.5 Diversos grupos de aplicaciones para ZigBee [2]

1.8 COMPARACIÓN CON OTRAS TECNOLOGIAS

Existen en el mercado varias tecnologías inalámbricas; a continuación se realiza una comparación con dos tecnologías de red muy populares hoy en día, Bluetooth y Wi-Fi.

Hay muchas alternativas inalámbricas asequibles a los diseñadores; comparando ZigBee con algunos de los estándares más populares que comparten la banda de 2.4 GHz sin licencia. Los parámetros mostrados en la siguiente tabla incluyen el estándar que debe seguirse a nivel de la capa dos (es decir el formato de la trama), la máxima velocidad de transmisión, el consumo de corriente típica en transmisión y en “standby”, los requisitos de memoria de programa para un dispositivo típico, aplicaciones y opciones de conexión de la red entre otras características.

	ZigBee (WPAN)	Bluetooth (WLAN/WPAN)	Wi-Fi (WLAN)
Estándar MAC	802.15.4	802.15.1	802.11
Alcance	70-300 m	10 (50-100) m	50-100 m
Máxima velocidad de tx	250 kbps	1 Mbps	hasta 54 Mbps
Velocidad efectiva	128 kbps	720 kbpd	30.6 Mbps (Ethernet) 2.6 Mbps (carga de 60 bytes)
Consumo de corriente	TX: 35 mA Standby: 3 mA	TX: 40 mA Standby: 200 mA	TX: > 400 mA Standby: 20 mA
Memoria de programa	32-60 KB memory	100+ KB memory	100+ KB memory
Latencia	30 ms	10 s	3 s
Complejidad	Simple	Complejo	Muy complejo
Seguridad	128 bit AES and Application Layer user defined	64 bit, 128 bit	Authentication Service Set ID (SSID)
Aplicaciones	Iluminación, sensores, control remoto,..	Telecom, audio,...	Internet,...
Opciones de conexión de red	Red en malla, punto a punto o punto a multipunto	Punto a multipunto	Punto a multipunto
Ventajas	Larga duración	Interoperabilidad	Gran ancho de banda

Figura 1.6 Comparación de las tecnologías ZigBee, Bluetooth y Wi-Fi

Bluetooth es un popular sistema de comunicación inalámbrico basado en el estándar IEEE 802.15.1. Bluetooth trabaja a una velocidad de transmisión de datos de 1 Mbps. Se puede ver que Bluetooth y ZigBee tienen similares corrientes en transmisión, pero ZigBee tiene un recurso significativamente mejor, más baja corriente en “standby”. Esto es debido a que los dispositivos en redes Bluetooth deben dar información a la red frecuentemente para mantener la sincronización, así que no pueden estar fácilmente en modo "Sleep" (modo de bajo consumo).

Wi-Fi o WLAN es una red que requiere la actividad casi ininterrumpida de los dispositivos en la red. La ventaja de este estándar es la cantidad tremenda de datos que se pueden transferir de un punto a multi-puntos, pero se puede ver que la corriente en transmisión es alta.

Se observa que de los tres estándares de radiofrecuencia, solamente ZigBee brinda la flexibilidad de la conexión de redes en malla; además de reducidos requisitos de memoria de programa. Las aplicaciones ZigBee son típicamente muy simples. La potencia está en la conexión de redes y el hecho de que los dispositivos “endpoint” de ZigBee pueden "dormir" mientras que se mantienen asociados a la red.

Uno de los puntos clave de la Figura 1.6 es mostrar que los estándares inalámbricos están basados en lo que se llaman "modelos de uso" o "aplicaciones". Ningún estándar cubre todos los requerimientos de todos los “modelos de uso”. Los diseñadores deben escoger el estándar que cubre mejor sus requisitos de aplicación.

Examinando la comparativa de los dos estándares más cercanos ZigBee y Bluetooth, ambos están en la categoría PAN, ambos tienen radios similares, pero no lo son en cuanto al consumo de energía. La diferencia entre los dos estándares está en su campo de aplicación.

Bluetooth apunta a las aplicaciones de una transferencia media de datos y servicio ininterrumpido, como transferencia de ficheros y transmisión de sonido en telecomunicaciones.

ZigBee, apunta a las aplicaciones de baja transferencia de datos y ciclos de servicio bajos. Dispositivos “endpoint” no transmiten o reciben tan frecuentemente en este tipo de aplicaciones, y permiten una duración de la pila excepcional.
Por ejemplo, si un sensor transmite una vez durante un minuto para informar sobre su estado y esto 10 veces al día, cuando hay un evento tal como abrir una puerta. En este caso con un dispositivo Bluetooth duraría 100 días y con un dispositivo ZigBee duraría 9.8 años, sobrepasando el tiempo de caducidad de la batería. Evidentemente, ZigBee es una mejor opción para este tipo de aplicación controlada por eventos.

1.9 TRANSMISORES DE CORRIENTE DE DOS HILOS [7]

No es reciente el interés por centralizar el control y supervisión de un proceso o planta industrial. Desde hace tiempo ya se detectó que la centralización era una alternativa más confiable y eficiente para manejar una planta industrial.

La solución para lograr la centralización empezó buscando vías para llevar de alguna manera la información desde los sensores y transductores hasta el cuarto

de control, donde indicadores y registradores darían al operador una vista global del estado de la planta.

Para llevar la información se creó el transmisor, un dispositivo de campo que tiene como tarea convertir la señal captada por un transductor [1] en una señal apta para ser transportada a una distancia considerable.

En el caso de los transmisores eléctricos, el problema a resolverse era cómo enviar una señal eléctrica desde un punto a otro, de tal manera que esta llegue en forma correcta.
En el diseño de los transmisores industriales se encontró que lo mejor es emplear una fuente de corriente constante para generar la corriente de transmisión. Teóricamente, con una fuente de corriente constante, esta debe mantener su valor independientemente de la carga que se ponga a la fuente, incluyendo en esa carga la longitud del cable de comunicación.

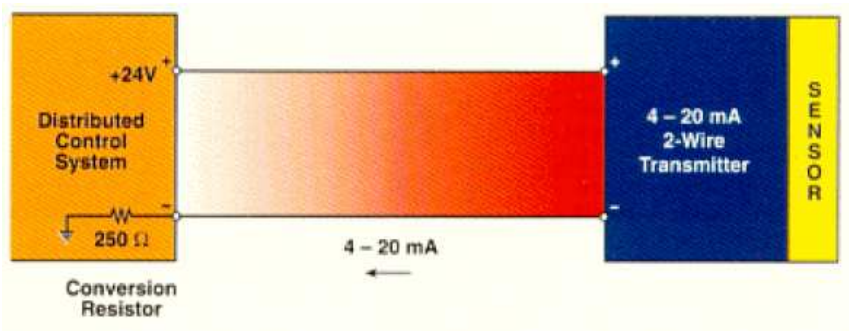


Figura 1.7 Trasmisor de corriente

En la Figura 1.7 se muestra la representación de un transmisor de dos hilos, la corriente que por norma deben generar es de 4 a 20 mA DC.

El transmisor ha probado por años ser una alternativa de comunicación adecuada y de allí su empleo extendido en la industria formando las redes análogas. Análogas pues el valor de la corriente varía continuamente en el tiempo dependiendo del valor de la variable física que capte el sensor.

1 Se define como transductor al elemento en el que se traduce la señal física en una salida eléctrica.

El transmisor de corriente ha sido y sigue siendo una excelente alternativa de comunicación, pero, tiene un inconveniente que ha impulsado que se busquen alternativas para su reemplazo. Este inconveniente tiene que ver con que se requiere una conexión para cada transmisor. Si un proceso o planta industrial tiene que monitorear muchas variables físicas y/o controlar muchos actuadores, el cableado aumente notablemente en costo y en mantenimiento.

1.9.1 LAZO ANALÓGICO DE CORRIENTE 4-20mA

La norma lazo de corriente ha tenido amplia difusión en el ámbito industrial. Se vincula con sensores de presión, caudal, temperatura, velocidad, etc.

Los dispositivos basados en esta norma consisten en un sensor asociado a un módulo electrónico denominado transmisor, este es usualmente un amplificador que establece una relación entre el parámetro sensado y la corriente de salida.

Es importante destacar que la salida del transmisor es de corriente, y que puede verse como un generador de corriente proporcional a la variable física sensada. La norma establece la siguiente relación: 4mA corresponderá a un extremo de la unidad física sensada y 20mA corresponde al extremo opuesto.

La Figura 1.8 muestra un ejemplo; en éste 0ºC corresponde a 4mA y 100ºC a 20mA.

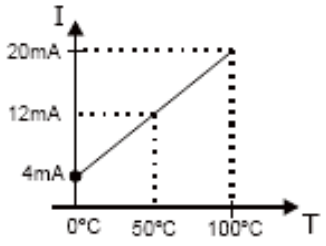


Figura 1.8 Corriente versus temperatura

1.9.1.1 Transmisores de dos hilos

En los modelos comerciales se presentan unidades transmisoras de 2 y 4 hilos, según se suministre la energía. Para el prototipo se utilizará transmisores de 2 hilos descritos a continuación:

2 Hilos. El transmisor utiliza solo dos hilos, por ellos se provee energía y además se extrae la corriente proporcional a la variable sensada.

El transmisor puede operar en un amplio rango de tensión, usualmente de 5V a 30Vcc, y consume en reposo 4mA, este valor corresponde al valor inicial de la variable sensada, toda corriente por arriba de este valor corresponderá a una variación en la variable de interés.

El empleo de 2 hilos hace más simple la instalación, pero demanda en el transmisor una electrónica un tanto más compleja. Otra ventaja del empleo de 2 hilos es que facilita la conexión de dos o más unidades en serie. Este es el transmisor preferido en la industria sobre todo porque por el mismo par de hilos se alimenta a dispositivos de campo.

CAPÍTULO II

DISEÑO DE LA RED ZIGBEE

CAPÍTULO II

DISEÑO DE LA RED ZIGBEE

El presente capítulo justifica la utilidad y describe el prototipo de adquisición de datos utilizando la tecnología ZigBee; permitiendo con ello generar un bosquejo general del sistema, válido para la construcción del hardware y software del proyecto.

2.1 INTRODUCCIÓN

2.1.1 REDES DE CAMPO INDUSTRIALES [7]

En la actualidad, con el nombre de redes de campo industriales se quiere identificar a aquellas que permiten recopilar (adquisición de datos) y/o supervisar y/o controlar generalmente desde un mismo sitio (panel/cuarto de control), las variables de una planta o proceso industrial.

Los valores acerca de temperatura, humedad, estado (abierto, cerrado) de válvulas, velocidad de giro de un motor, etc., son enviados al centro de control por dispositivos tales como transductores y/o, principalmente, transmisores. Con la información se toman decisiones, sea en forma supervisada o automática, para comandar los actuadores que lograrán activar/desactivar dispositivos de campo que procuran mantener trabajando al proceso dentro de valores definidos por el usuario.

Para llegar al estado actual de la tecnología, se empezó por buscar como reemplazar al instrumentista, quien en forma manual, y de allí su falta de confiabilidad, recolectaba los valores de las variables de campo del proceso.

El resultado se dio en la forma de redes industriales basadas sobre todo en la invención y consecuente empleo de los trasmisores de corriente continua. Estos

posibilitaron el envío (de allí el nombre de transmisor) de los datos de las variables de un proceso a las distancias que se necesitan en una planta industrial. No es reciente el interés por centralizar el control y supervisión de un proceso o planta industrial. Desde hace tiempo ya se detectó que la centralización era una alternativa más confiable y eficiente para manejar una planta industrial. Tener a un instrumentista en caminatas periódicas por toda una planta leyendo valores de los instrumentos era una actividad tediosa y propensa a omisiones y/o errores humanos.

La solución para lograr la centralización empezó buscando vías para llevar de alguna manera la información desde los sensores y transductores hasta el cuarto de control, donde indicadores y registradores darían al operador una vista global del estado de la planta. Como resultado de esta búsqueda aparecieron los transmisores de corriente (4 a 20mA DC) explicados en el literal 1.9 del presente Proyecto de Titulación.

2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO A IMPLEMENTARSE

Incentivada por esta tendencia, el proyecto describe la construcción de un prototipo de adquisición de datos con la principal característica de que se implementa en base a una red inalámbrica de bajo costo y bajo consumo de potencia.

El prototipo se encuentra dirigido a cubrir un proceso de adquisición de datos correspondiente a las variaciones de temperatura y humedad relativa, donde los datos provenientes del prototipo serán procesados mediante un software de gestión y visualización que se desarrollarán posteriormente.

Para cumplir con los requerimientos en cuanto al costo y consumo de energía fue seleccionada ZigBee como la tecnología sobre la cual se diseña el prototipo, ya que además de ser una tecnología relativamente nueva y de estándar abierto (no propietario), tiene la virtud de requerir componentes sencillos para su implementación.

2.2.1 GENERALIDADES

El prototipo elaborado para la adquisición de datos consta de tres nodos (un coordinador o maestro y dos terminales o esclavos) que se comunican inalámbricamente, y un computador que se comunica de forma serial con el nodo maestro.

El coordinador tiene la tarea de iniciar y mantener la red ZigBee, y de recibir los datos provenientes de los esclavos (terminales de recepción de temperatura y humedad relativa) para transferirlos al computador para su visualización.

Cada terminal dispone de dispositivos de entrada/salida (sensores de temperatura y humedad relativa/display de cristal líquido); lo que permite observar los valores medidos por cada uno de los terminales.

El computador posee un software que permite la configuración de la red, de los canales y direcciones del transmisor XBEE; además, el software implementado recopila la información de temperatura y humedad relativa y los presenta en la pantalla del computador.

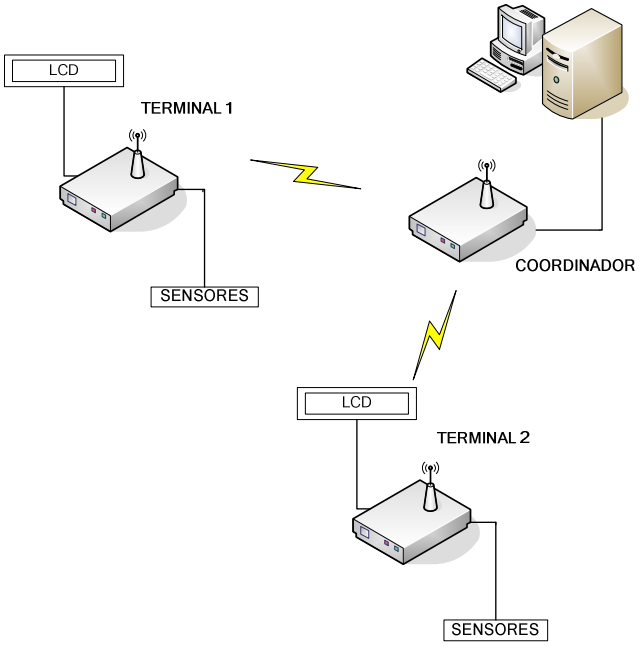


Figura 2.1 Representación del proyecto

En el prototipo a diseñarse, cada dispositivo terminal estará encargado de medir dos variables (temperatura y humedad relativa). Tomando en cuenta que la velocidad de ZigBee es de 115.2kbps y que para cualquier comunicación se empaquetarán los datos en tramas de 64 bits, entonces, el número total de tramas que podrían transportarse por el enlace ZigBee sería de: $\#\,\text{tramas} = \frac{115200}{64} = 1800$

Tomando en consideración que para leer un dato desde los esclavos, el maestro envía una trama de petición de dato y regresan dos (una para la temperatura y otra para la humedad) en total por el enlace ZigBee se podrían tomar datos desde 600 esclavos (# tramas/3). Por supuesto este es un cálculo ideal pues no toma en consideración el tiempo que el maestro demorara en establecer una sesión de trabajo con cada esclavo, además se debe tomar en cuenta características y limitaciones de los dispositivos utilizados en el hardware así como también retardos de propagación y de procesamiento en los diferentes componentes electrónicos por donde pasan los datos.

El cálculo realizado, a pesar de ser tan solo aproximado, sirve para demostrar que el ancho de banda de ZigBee es suficiente para transportar variables industriales.

Pero, por otro lado, no se debe olvidar que en el presente proyecto no hay una recolección automática desde los esclavos por parte del maestro. Al contrario, el sistema está diseñado para que un operador humano, decida manualmente cuando desea leer un dato desde un esclavo; consecuentemente, el ancho de banda de ZigBee es más que suficiente para el tráfico generado en el proyecto que aquí se describe.

2.2.2 DESCRIPCIÓN DEL TRÁFICO DEL PROTOTIPO

Las aplicaciones específicas de sondeo y monitoreo manejan un flujo periódico y continuo de información. En consecuencia, el tráfico que se movilizará en el proyecto es periódico, como es el caso de sistemas de sensores utilizados para controlar la temperatura y humedad relativa (variables aplicadas para el presente

proyecto) en los cuales se necesita medir de forma constante la variable a controlar.

2.2.3 TOPOLOGÍA

Teniendo en cuenta distintas limitaciones como la accesibilidad y costo para conseguir los dispositivos y herramientas necesarias (módulos, microcontroladores, programador, software, etc.); y al ser un modelo prototipo, se decidió demostrar la factibilidad y sencillez de formar una red ZigBee a través de la implementación de una red básica, por lo que se ha escogido la topología estrella.

Con mayores recursos económicos en el futuro se podrá implementar redes con topologías más complejas, las mismas que soportan un número de nodos mayor y tienen un mayor alcance. Sin embargo, se requerirá de mejores módulos que necesitan mayores capacidades de memoria para almacenar la información sobre la red.

2.3 PROCEDIMIENTO GENERAL DE LA ADQUISICIÓN DE DATOS

A continuación se describe el procedimiento general para llevar a cabo la recolección de datos a partir de los nodos terminales:

- Utilizando el software a realizarse se podrá escoger el modo de operación, el canal en cual van a trabajar y las direcciones de los dispositivos terminales.

- Una vez escogidos estos parámetros, la red prototipo empieza a recolectar valores de humedad y temperatura relativa, proporcionados por los respectivos sensores en cada nodo terminal.

- Estos valores son transmitidos desde el terminal al coordinador utilizando los módulos inalámbricos; el coordinador a su vez transmite estos datos al computador, el mismo que los procesa y los presenta al usuario de forma clara y detallada; es decir, indicando su valor y sus respectivas unidades. (grados de temperatura y porcentaje de humedad).

2.4 DISEÑO DEL HARDWARE

Se describe el proceso de selección y diseño de los dispositivos, y los componentes requeridos para el funcionamiento de la red ZigBee que soporta el prototipo de adquisición de datos.

2.4.1 FUNCIONES DEL HARDWARE

El hardware tiene las siguientes responsabilidades:

1. Incluir dispositivos para la transmisión y recepción de datos formando una red inalámbrica bajo el estándar ZigBee.
2. Permitir la interacción de los terminales con los transmisores de corriente de dos hilos que adquieren señales analógicas desde sensores industriales (temperatura y humedad relativa).
3. Permitir la comunicación serial entre el computador y el coordinador ZigBee.
4. Proporcionar la interfaz necesaria para la programación del software requerido por los nodos.
5. Suministrar la energía requerida para el funcionamiento de los distintos módulos.

2.4.2 SELECCIÓN DE COMPONENTES BÁSICOS EN LOS NODOS ZIGBEE

En el mercado se dispone de dos opciones en sistemas de desarrollo:

- ✓ **Módulos Comerciales:** Incorporan en un solo empaque un dispositivo de control (microprocesador), el transceiver RF e incluye el programa para su

funcionamiento. Su principal ventaja es el tamaño, la facilidad de manejo y gran soporte brindado, su desventaja es el alto precio de los kits de desarrollo ($2000 en adelante por kit).

- ✓ **Sistemas Microcontrolados:** Su ventaja principal está en el precio y flexibilidad en el diseño, ya que se requiere solo añadir el transceiver al microcontrolador. Sus principales desventajas son los procesos de adquisición y armado, limitaciones de memoria, y la necesidad de crear o conseguir las librerías necesarias para desarrollar el programa requerido por el microcontrolador.

Por razón de costos la construcción e implementación de los nodos será efectuado en base a los sistemas microcontrolados.

2.4.2.1 Selección del microcontrolador PIC [8]

Se denomina microcontrolador a un dispositivo programable capaz de realizar diferentes actividades que requieran del procesamiento de datos digitales y del control y comunicación digital de diferentes dispositivos.

Los microcontroladores poseen una memoria interna que almacena dos tipos de datos; las instrucciones, que corresponden al programa que se ejecuta, y los registros; es decir, los datos que el usuario maneja, así como registros especiales para el control de las diferentes funciones del microcontrolador.

La elección (arquitectura, marca y modelo) se basa en sus características de memoria de programa y de datos adecuados para la aplicación, velocidad, disponibilidad de puertos (que serán requeridos por los dispositivos a ser conectados), periféricos internos incluidos (conversores A/D). Debido a que se utilizarán sensores analógicos es necesario que el microcontrolador a seleccionar posea esta capacidad con lo que el prototipo no aumentará de tamaño al adicionar conversores externos, y facilidad de programación al momento de realizar el software para el prototipo.

Debido a que se espera conectar en cada terminal dos sensores (2 pines), un LCD (16 pines) y el transceiver RF (10 pines), se requiere de por lo menos 28 pines. Por ello se elige un microcontrolador de 40 pines.

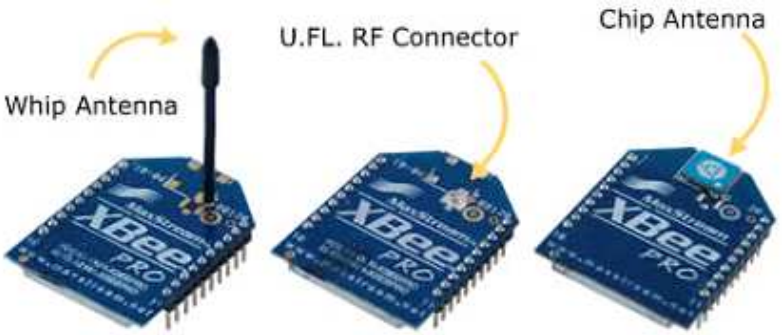
En el mercado existen diversas marcas y modelos de microcontroladores. Tomando en cuenta las necesidades de este prototipo, así como la disponibilidad en el mercado, el costo, documentación, herramientas para la programación etcétera, se optó por trabajar con el microcontrolador PIC 16F877 del fabricante MICROCHIP. Este microcontrolador será utilizado en los terminales (esclavos).

2.4.2.2 Transceiver RF [9]

El transceptor (transceiver) de radiofrecuencia tiene como tarea principal la transmisión y recepción de datos que son suministrados por el microcontrolador.
Para el prototipo a implementarse se utilizarán los módulos XBee-PRO; que son módulos de radio frecuencia que trabajan en la banda de 2.4 GHz con protocolo de comunicación 802.15.4 fabricados por MAXSTREAM.

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

Los módulos XBee-PRO tienen un alcance en interiores de hasta 100 metros, y en exteriores el alcance es de hasta 1500 metros. En la Figura 2.2 se muestran los tres diferentes tipos de XBee-PRO.



ANCHO: 24.38 mm
LARGO: 32.94mm
ALTO DE ANTENA: 25 mm

Figura 2.2 Tipos de XBee-PRO

Los módulos XBee pueden ser programados a través del hyperterminal y una interface serial con un MAX232 y una serie de comandos llamados AT.

Existen dos tipos de interfaces, serial y USB, que pueden ser utilizadas para programar los módulos XBee con un software propietario llamado X-CTU. Con este software se puede definir de una forma rápida todos los parámetros que se quiera modificar en los módulos.

Una de las ventajas es que se puede tener hasta 65000 combinaciones distintas de red y se pueden hacer redes punto a punto y punto a multipunto.

Los módulos tienen 6 convertidores análogo-digital y 8 entradas digitales además de RX y TX.

El módulo XBee-PRO fue escogido principalmente porque requiere un reducido número de componentes externos para su correcto funcionamiento; además de utilizar un software libre para su configuración.

En el E se encuentra el datasheet del XBee-PRO donde se puede observar con mayor detalle las características del mismo.

2.4.3 COMPONENTES DEL COORDINADOR DEL PROTOTIPO DE ADQUISICIÒN DE DATOS

Adicionalmente al transceiver RF se requieren de otros componentes para cumplir las tareas establecidas. La Figura 2.3 muestra los dispositivos que conforman el nodo coordinador.

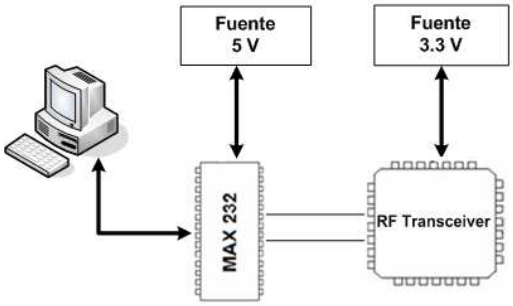


Figura 2.3 Componentes del nodo coordinador

2.4.3.1 Descripción de los componentes del nodo coordinador ZigBee

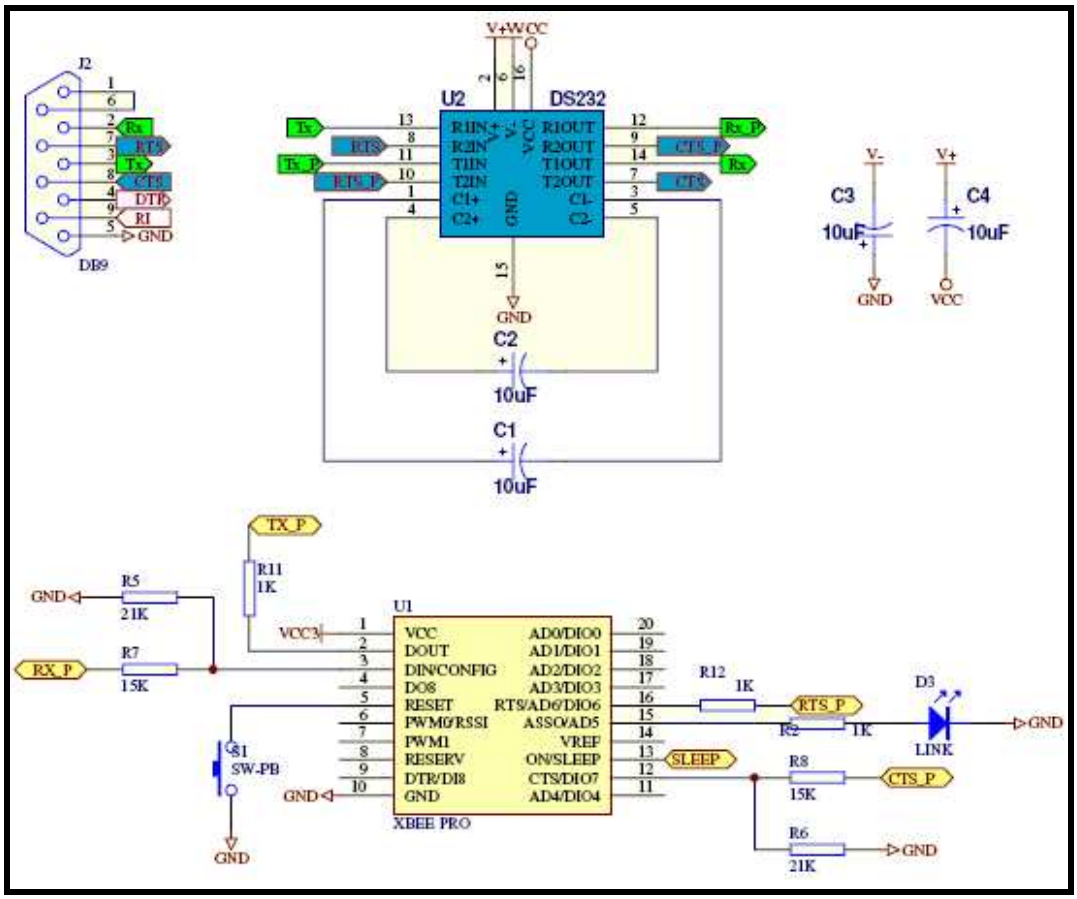


Figura 2.4 Diagrama esquemático del nodo coordinador

2.4.3.1.1 Comunicación serial

Para la comunicación serial se utiliza un conversor MAX232 para lograr la comunicación entre el computador personal y el transceiver de RF. Este dispositivo transforma las señales digitales de voltajes TTL a valores aceptados por la interfaz RS-232. Se utiliza además el conector serial DB9. como se observa en la Figura 2.4.

2.4.3.1.2 Módulo XBee-PRO [10]

En la Figura 2.4 se tiene el módulo XBee-PRO con la circuitería necesaria. Utiliza algunas resistencias que sirven de protección para el módulo, evitando así que este se dañe.

Estas resistencias fueron calculadas en base a la corriente que soporta el módulo y la corriente que es capaz de entregar el microcontrolador, considerando además si es una entrada para el módulo o una salida del módulo.

Para una salida: Tomando en cuenta que la corriente de salida del módulo es I_{OUT} = 2mA, de la Figura 2.4 se tiene:

$$\frac{5V_{DC} - 3.3V_{DC}}{R} \leq 2mA$$

Donde:

$5V_{DC}$	Voltaje del microcontrolador
$3.3V_{DC}$	Voltaje del módulo
R	Resistencia

Despejando R se tiene: $R \geq 850\ \Omega$ para el prototipo se utiliza una resistencia estándar $R \geq 1\ k\Omega$ como se observa en la Figura 2.4.

Para una entrada: Tomando en cuenta que la corriente de entrada del módulo es I_{IN} = 0.025µA y la corriente que entrega el pin del microcontrolador es 20mA se calculó el valor de las resistencias utilizadas.

Teniendo un voltaje de 5 V_{DC} (voltaje del microcontrolador) se puede calcular R_T para los dos casos:

$$R_T = \frac{5V_{DC}}{20mA} = 250\Omega \quad y \quad R_T = \frac{5V_{DC}}{0.025\mu A} = 200M\Omega$$

Donde R_T es la resistencia equivalente de las dos resistencias en serie que se utilizan en el módulo. Por lo tanto se debe cumplir: $250\Omega < R_T < 200M\Omega$, donde $R_T = R_5 + R_7 = R_6 + R_8$ como se observa en la Figura 2.4.

Para obtener los valores de las resistencias adecuadas se utilizó un divisor de voltaje, donde: $3.3V_{DC} = \frac{5V_{DC} * R_5}{R_5 + R_7}$

Se escogió resistencias estándar R_5 = 21kΩ con lo que se obtuvo R_7 = 15kΩ como se observa en la Figura 2.4.

Tabla 2.1 Componentes del nodo coordinador

REFERENCIA	DESCRIPCIÓN
Componentes para la comunicación serial	
DB9	Conector serial DB9
U2	Conversor MAX232
C1, C2, C3, C4	Capacitor 10µF
Elementos del módulo XBee-PRO	
R2, R11, R12	Resistencia 1kΩ
R5, R6	Resistencia 21kΩ
R7, R8	Resistencia 15kΩ
D3	LED
SW-PB	Pulsador para el reset

2.4.4 COMPONENTES DE LOS NODOS TERMINALES/ESCLAVOS DEL PROTOTIPO DE ADQUISICIÓN DE DATOS

A más del microcontrolador y el transceiver de RF, se añaden otros dispositivos al nodo ZigBee para desempeñar la labor de una terminal de adquisición de datos, cuya composición se muestra en la Figura 2.5.

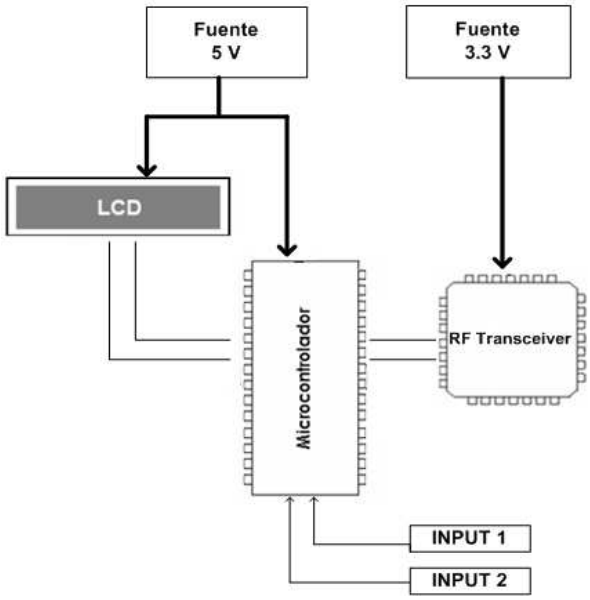
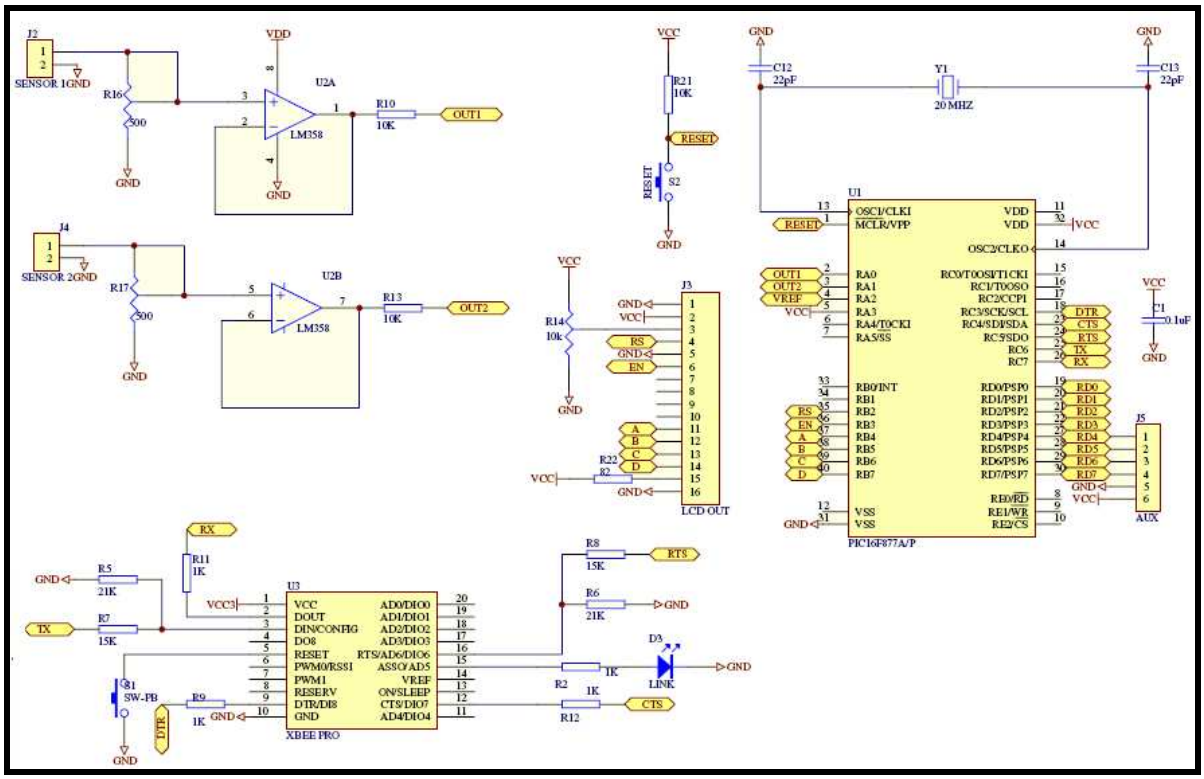


Figura 2.5 Componentes del terminal de adquisición de datos

2.4.4.1 Descripción de los componentes de los nodos terminales ZigBee



PRINTED IN U.S.A.
C731g–0–11/99

2.4.4.1.1 Acondicionamiento de entrada al microcontrolador PIC

El prototipo de adquisición de datos utiliza sensores de temperatura y humedad relativa. Para poder realizar la recolección de estos datos es necesario acondicionar las señales para que estas puedan ser transmitidas al microcontrolador PIC.

Para cada uno de los sensores se utiliza el integrado AD694, el mismo que entrega una corriente estándar de 4 a 20mA. Esta corriente ingresa al amplificador operacional, el cual amplifica la señal.

Utilizando la ley de ohm V= I*R se puede calcular la resistencia a la entrada del amplificador donde el voltaje está limitado por los 5 V_{DC} que pueden ingresar al microcontrolador PIC.

El valor más alto de corriente que se puede tener a la entrada del amplificador es 20mA, debido a que la corriente de entrada varia se recomienda utilizar un potenciómetro de 500Ω, con lo cual se obtiene un voltaje entre 1 y $5V_{DC}$, admisibles por el microcontrolador PIC.

2.4.4.1.2 Microcontrolador PIC16F877

Los dispositivos externos como sensores, módulo RF, LCD, entre otros; están conectados a través de diferentes circuiterías a las líneas de entrada/salida del PIC, la distribución de los mismos se puede observar en la Figura 2.6.

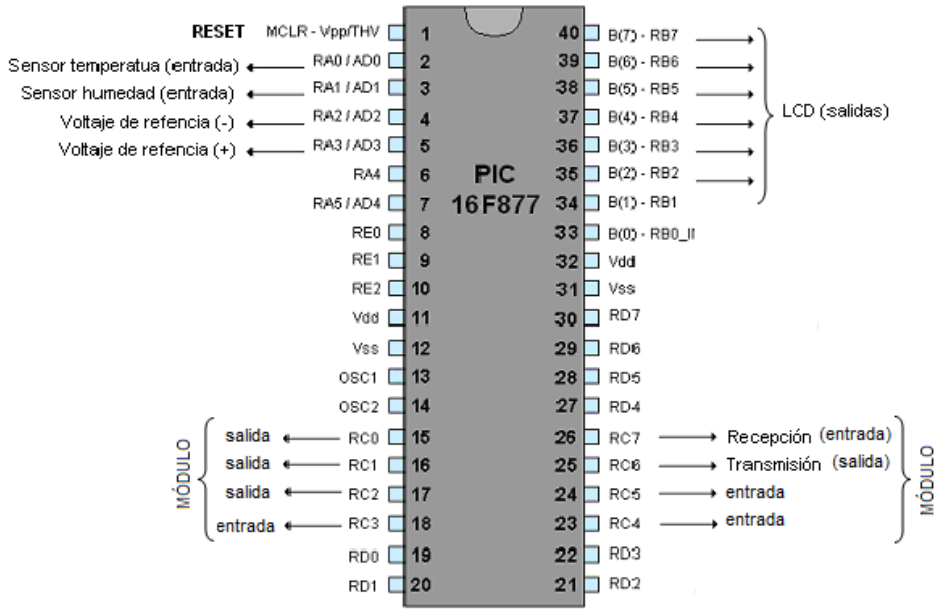


Figura 2.7 Conexiones a las líneas de entrada/salida del PIC

Se utiliza un voltaje de referencia positivo correspondiente a V_{CC} y un voltaje de referencia negativo de $1V_{DC}$, necesarios para la conversión. Es necesario que los voltajes de referencia tengan una mínima variación, para no afectar la resolución del conversor.

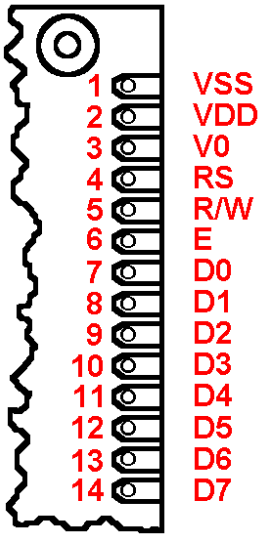
En el circuito el Microcontrolador PIC 16F877 tiene sus respectivas conexiones de polarización así como un oscilador externo de 20 MHz y requiere que los respectivos condensadores estén en el rango de 15 a 33 pF. Esto se observa en la Figura 2.6.

2.4.4.1.3 Módulo XBee-PRO

En la Figura 2.6 se muestra el módulo XBee-PRO con la circuitería necesaria. Utiliza algunas resistencias que sirven de protección para el módulo. (Ver literal 2.4.3.12).

2.4.4.1.4 Display LCD [11]

Los módulos LCD (Liquid Crystal Display) son compactos y necesitan muy pocos componentes externos para un funcionamiento correcto. La función principal de estos módulos es la de visualizar los caracteres deseados por el usuario.



Este dispositivo dispone de 14 pines de los cuales 2 son para alimentación (VSS y VDD), 1 para ajuste de contraste (V0), 3 para control (RS, R/W y E) y los restantes 8 para transmisión/recepción de datos (D0-D7).
En la figura presentada a la derecha se muestra el aspecto y posición de los pines de un módulo LCD estándar. Existen también módulos LCD que disponen de 16 pines, usualmente se suman dos pines para la iluminación del LCD mediante LEDs, comúnmente llamado “backlight” o luz de fondo.

La forma más sencilla de controlar los módulos LCD es a través de un microcontrolador. Para ello se seleccionó el PIC16F877 conectado al módulo LCD.

Tabla 2.2 Componentes del nodo terminal

REFERENCIA	DESCRIPCIÓN
Acondicionamiento de los valores sensados (temperatura y humedad) al PIC	
J2, J4	Borneras
R16, R17	Potenciómetros de 500Ω
LM358	Amplificador operacional
R10, R13	Resistencias de 10kΩ

Componentes del microcontrolador PIC 16F877	
S2	Pulsador (reset)
R21	Resistencia de 10kΩ
C12, C13	Capacitores de 22pF
Y1	Cristal de 20MHz

Elementos del módulo XBee-PRO	
R2, R11, R12	Resistencia 1kΩ
R5, R6	Resistencia 21kΩ
R7, R8	Resistencia 15kΩ
D3	LED
SW-PB	Pulsador para el reset

Componentes del LCD	
R14	Resistencia de 10kΩ
R22	Resistencia de 82Ω

Las entradas al microcontrolador PIC que se observan en la Figura 2.5 corresponden a las salidas de las tarjetas de acondicionamiento de los sensores de temperatura y humedad relativa, aquí se utilizan los transmisores de corriente que serán descritos en el siguiente capítulo.

2.5 PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN

Para la comunicación entre los dispositivos del prototipo se estableció un protocolo de comunicación, el cual permitirá interpretar los datos enviados y recibidos por cada módulo respectivamente. El protocolo consta de 8 bytes como se muestra en la Figura 2.8, en el siguiente capítulo se explicará para que sirve cada byte de acuerdo a la tarea realizada.

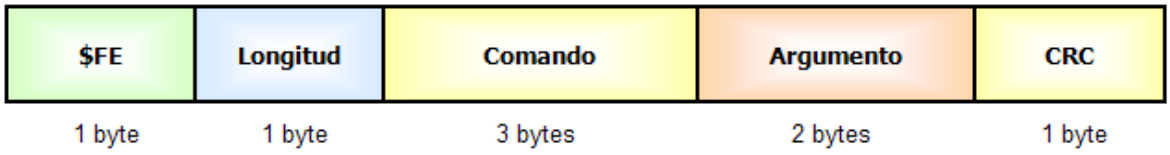


Figura 2.8 Protocolo de comunicación

Para el prototipo el control de flujo se realiza mediante software, esto es comparando el CRC recibido y el CRC calculado del protocolo de comunicación a utilizarse.

La comunicación entre el coordinador y el terminal se implementa mediante un ciclo de envío y recepción. El coordinador es el único que puede iniciar la comunicación mediante el envío de la trama. El esclavo ejecuta una acción solicitada por el coordinador y emite una respuesta con otra trama.

Se considera necesario abordar este tema a fin de facilitar la comprensión del siguiente capítulo, en el que se describe el software del microntrolador PIC y de la aplicación para el PC.

CAPÍTULO III

CONSTRUCCIÓN DEL HARDWARE Y DESARROLLO DEL SOFTWARE

CAPÍTULO III

CONSTRUCCIÓN DEL HARDWARE Y DESARROLLO DEL SOFTWARE

Este capítulo expone las características del hardware y del software del terminal y del coordinador requerido para el funcionamiento del prototipo de adquisición de datos de temperatura y humedad relativa. El software del terminal está constituido por el programa del microcontrolador PIC16F877. El software del coordinador es una aplicación para un PC, la cual sirve de interfaz gráfica de usuario. El PC se comunica con el coordinador a través del puerto serial.

3.1 PARTES FUNDAMENTALES DEL PROTOTIPO

El prototipo para la adquisición de la temperatura y humedad relativa consta básicamente de tres partes fundamentales:

1. La primera parte que se encuentra formada por: el host (en este caso el computador personal), el cual contiene la aplicación que sirve de interfaz entre el usuario y las variables a medir (temperatura y humedad relativa), y por el módulo XBee (coordinador), el mismo que se encuentra montado sobre un circuito convertidor de voltajes que utiliza un conector serial DB9 para comunicarse con el host. Esta tarjeta electrónica se encarga de transformar los niveles de voltaje RS232 que arroja el computador, en niveles CMOS (3.3 V), que es el voltaje con el cual trabaja el dispositivo ZigBee.
2. La segunda parte consta de los transmisores de corriente que adquieren señales análogas desde sensores industriales (temperatura y humedad relativa).
3. La tercera parte está formada por el módulo remoto (terminal) que en conjunto con el microcontrolador PIC, acondiciona las señales adquiridas para transmitirlas al coordinador.

3.2 DESCRIPCIÓN DE LOS SENSORES UTILIZADOS PARA EL PROTOTIPO

Los sensores de temperatura y humedad relativa utilizados para el prototipo requieren de otros componentes para cumplir las tareas establecidas, a continuación se describen los componentes necesarios para cada sensor.

3.2.1 SENSOR DE TEMPERATURA

3.2.1.1 Descripción del sensor de temperatura

En la Figura 3.1 se muestra el diagrama esquemático del sensor de temperatura que consta del amplificador AD595, del transmisor AD694 y de la termocupla tipo K.

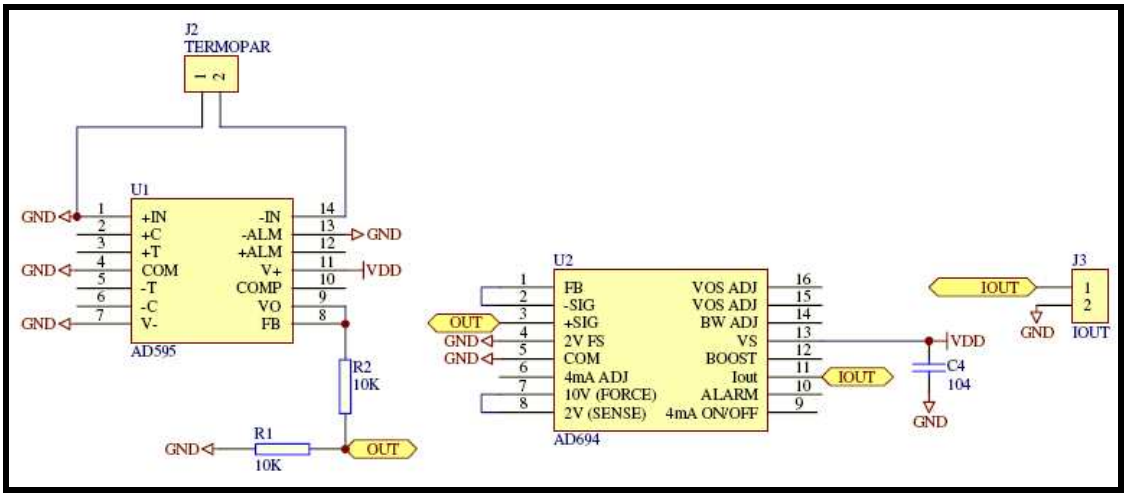


Figura 3.1 Diagrama esquemático del sensor de temperatura

3.2.1.1.1 Termocupla tipo K [12]

Las termocuplas son el sensor de temperatura más común utilizado industrialmente. Las termocuplas tipo K son las que más se utilizan debido a su capacidad de resistir mayores temperaturas, se caracterizan por ser sensores de temperatura de bajo costo. Una termocupla es un dispositivo que traduce la temperatura en una señal eléctrica. Está constituida por dos alambres metálicos diferentes que unidos desarrollan una diferencia de potencial eléctrica entre sus extremos libres, el mismo que es aproximadamente proporcional a la diferencia de

temperaturas entre estas puntas y la unión. Se suelen fabricar con metales puros o aleaciones (caso más común) y la característica más notable es que son empleadas para medir temperaturas en un rango considerablemente amplio comparadas con otros elementos. Existen varios tipos de termocuplas que trabajan a diferentes rangos de temperatura, como se muestra en la Tabla 3.1:

Termocupla tipo	Temperatura(° C) Mínima	Máxima
B	100	1800
E	-270	790
J	-210	1050
K	-270	1370
N	-260	1300
R	-50	1760
S	-50	1760
T	-270	400

Fuente: www.azom.com

Tabla 3.1 Rangos de temperatura de termocuplas

En la práctica se tuvo dificultad en el acondicionamiento de la termocupla ya que esta entregaba valores muy cambiantes lo que hacía imposible tener los valores deseados a la salida del acondicionamiento. Para resolver este inconveniente y tomando en cuenta la aplicación que es medir temperatura ambiental se seleccionó el amplificador AD595, descrito a continuación.

3.2.1.1.2 Amplificador AD595AQ [13]

Para amplificar la señal del termopar tipo K, se utilizará el circuito integrado AD595; principalmente, porque está diseñado para trabajar con dicho sensor. Usar el circuito con el AD595 resulta mejor, debido a que es más económico y el número de conexiones es menor en relación con la cantidad de elementos que se utilizan (Figura 3.1).

El AD595 es un circuito integrado de precisión (con una precisión de 1ºC calibrado a temperatura ambiente 25℃) que actúa como un sensor de temperatura graduado directamente en grados centígrados (℃) y un rango que abarca desde

-55ºC a +125ºC. Su tensión de salida es lineal y proporcional a la escala Celsius de temperatura, teniendo una variación de 10mV por cada grado centígrado.

Su salida lineal y su precisa calibración, hace posible una fácil instalación en un circuito de control; permitiendo amplificar la señal y eliminar el ruido generado por el temopar.

La desventaja de todos los sensores integrados es el rango de medida muy limitado, hasta 150 ºC como máximo.

Una característica especial del AD595 es que permite ampliar su rango de trabajo; utilizando un voltaje de alimentación de 5V a 15V se puede obtener hasta 1250ºC.

En el Anexo F se puede observar en detalle las características del amplificador.

3.2.1.1.3 Parámetros considerados en la medición de la temperatura

Para medir la temperatura con el circuito integrado AD595 se utiliza el diagrama mostrado en la Figura 3.1. En donde el voltaje de salida del amplificador AD595 está en función del voltaje de entrada al transmisor AD694.

El AD694 es un transmisor de corriente que acepta niveles altos de entradas pre calibradas; de 0V a 2V y de 0V a 10V; entregando salidas estándar de 4 a 20mA; actual lazo de corriente utilizado en el control de válvulas, actuadores, y otros dispositivos comúnmente utilizados en el control de procesos.

Tabla 3.2 Rangos pre calibrados para el AD694 [14]

Input Range	Output Range	Voltage Reference	Min V_S
0–2 V	4–20 mA	2 V	4.5 V
0–10 V	4–20 mA	2 V	12.5 V
0–2.5 V	0–20 mA	2 V	5.0 V
0–12.5 V	0–20 mA	2 V	15.0 V
0–2 V	4–20 mA	10 V	12.5 V
0–10 V	4–20 mA	10 V	12.5 V
0–2.5 V	0–20 mA	10 V	12.5 V
0–12.5 V	0–20 mA	10 V	15.0 V

Para el prototipo se escoge el rango de entrada de 0V a 2V, de donde se tendrá 4mA y 20mA, respectivamente.

Tomando en cuenta que el rango de entrada escogido es de 0V a 2V y considerando que el circuito integrado mencionado tiene una variación de 10mV/ºC; los valores máximos y mínimos de temperatura obtenidos a la salida serán de 0ºC y 200ºC, respectivamente.

El prototipo se ha calibrado para trabajar desde 0ºC hasta 400ºC; mediante el uso de un divisor de voltaje (Figura 3.1), cuyo objetivo es ampliar el rango de la temperatura, obteniéndose así una variación de 5mV/ºC.

Utilizando el circuito de la Figura 3.1 se consiguió acondicionar la señal mediante el uso de amplificadores operacionales para que sea receptada y procesada por el microcontrolador PIC.

Tabla 3.3 Componentes del sensor de temperatura

REFERENCIA	DESCRIPCIÓN
Acondicionamiento del sensor de temperatura (termocupla tipo K)	
TERMOPAR	Termocupla tipo K
J2, J3	Borneras
U1	AD595AQ
R1, R2	Resistencias de 10kΩ
U2	Transmisor AD694AQ
C4 (104)	Capacitor cerámico de 100Nf

En el Anexo G se puede observar en detalle las características del transmisor.

3.2.2 SENSOR DE HUMEDAD

3.2.2.1 Descripción del sensor de humedad

En la Figura 3.2 se muestra el diagrama esquemático del sensor de humedad que consta del transmisor AD694, del sensor de humedad y el amplificador diferencial.

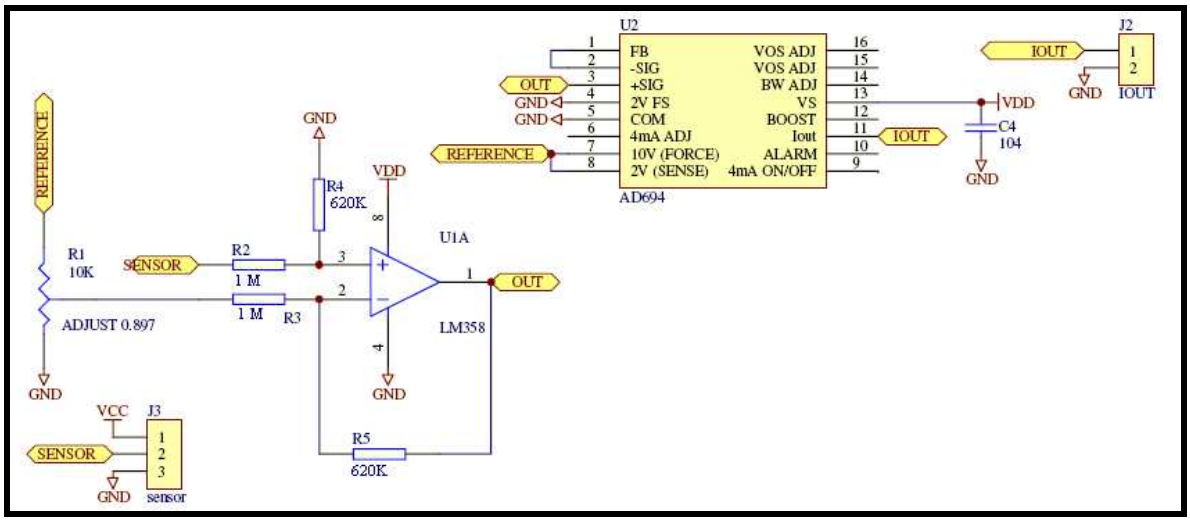


Figura 3.2 Diagrama esquemático del sensor de humedad

3.2.2.1.1 Sensor de humedad HIH-3610 [15]

En la Figura 3.3 se presenta las características generales de este sensor. En la Figura 3.2 se observa el circuito de acondicionamiento necesario para acoplar la salida del sensor de humedad al transmisor AD694 y en el Anexo H se proporcionan las características técnicas de dicho sensor.

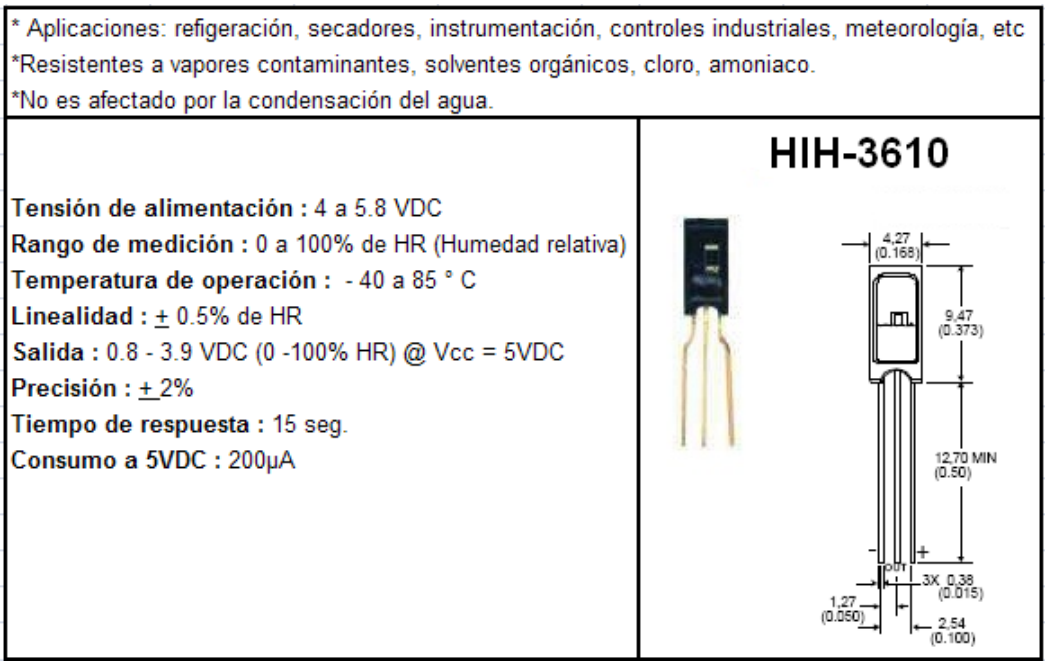


Figura 3.3 Características del sensor HIH-3610

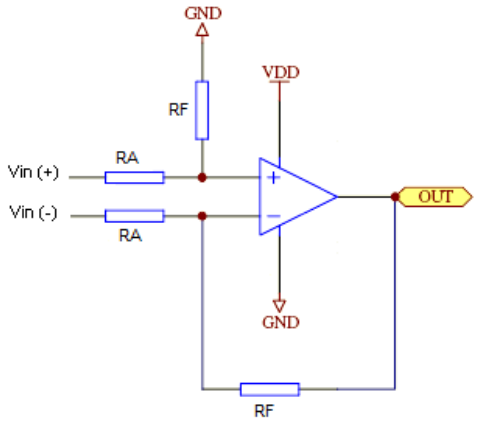
3.2.2.1.2 Parámetros considerados en la medición de la humedad relativa

Para procesar el valor de voltaje correspondiente a la humedad relativa proveniente del sensor, se utiliza un amplificador operacional que en conjunto con el circuito de la Figura 3.2 permite obtener un voltaje de salida, que será acoplado al transmisor AD694.

Tomando en cuenta que el voltaje de salida del sensor a temperatura ambiente, dado por las especificaciones técnicas del fabricante, está dado por la siguiente ecuación:

$$V_{Out} = V_{Supply} * (0.0062(Sensor\ RH) + 0.16)$$

Los voltajes de salida del sensor de humedad son de 0.8 y 3.9V_{DC}, reemplazando estos valores en la ecuación anterior se obtiene 0 y 100 %, respectivamente.



Como se puede observar en la Figura 3.4, el voltaje de salida del amplificador utilizado es igual a:

$$V_O = (V_{IN+} - V_{IN-}) * \left(\frac{R_F}{R_A}\right)$$

Donde el $V_{IN-} = V_{REF} = 0.8$, mínimo valor que se puede obtener del sensor.

Figura 3.4 Amplificador diferencial

Si, $V_{IN+} = 0.8$ se tiene: $V_{O\ mín.\ (0\%)} = (0.8 - 0.8) * \left(\frac{R_F}{R_A}\right) = 0;$

$V_{IN+} = 3.9$ se tiene: $V_{O\ máx.\ (100\%)} = (3.9 - 0.8) * \left(\frac{R_F}{R_A}\right);$

Para el prototipo el $V_{O\ máx.\ (100\%)}$ es 2V_{DC}, ya que se utiliza el transmisor de corriente AD694, cuyas entradas escogidas para el prototipo son de 0 y 2V_{DC}; entregando salidas de 4 a 20mA, respectivamente.

Reemplazando se tiene: $V_{O\ máx.\ (100\%)} = (3.1) * \left(\frac{R_F}{R_A}\right) = 2$ de donde $\frac{R_F}{R_A} = 0.64$

Tomando en cuenta que el consumo de corriente máxima del sensor es de 200µA tenemos:

$$V = I * R, \qquad 3.9V_{DC} = I\,(R_F + R_A), \qquad I = \frac{3.9}{(R_F + R_A)}$$

Considerando que I < 200 µA se tiene: $\frac{3.9}{(R_F + R_A)} < 200\mu A$; para el prototipo se considero que sea 10 veces menor: $\frac{3.9}{10 * (R_F + R_A)} < 200\mu A$

Con estas condiciones se escogieron las resistencias: R_F = 620kΩ y R_A = 1MΩ, valores estándar que permiten obtener la relación calculada.

Hay que recalcar que es importante tomar en cuenta el consumo de corriente del sensor, ya que en la práctica se tuvo problemas porque se utilizaron resistencias de valores muy bajos de 6.2kΩ y 9.7kΩ, lo que provocaba un consumo de corriente mayor que lo aceptado por el sensor; esto no permitía obtener a la salida los valores de voltaje deseados.

Utilizando el AD694 se obtiene el voltaje de referencia V_{REF} = 0.8V_{DC}, empleando la salida de 2V_{DC} que se obtiene de este transmisor, siempre y cuando la alimentación sea mayor a 4.5V_{DC} y utilizando una resistencia variable (potenciómetro) se obtiene los 0.8V_{DC} necesarios a la entrada del amplificador; como se puede ver en la Figura 3.2.

Utilizando la circuitería adecuada se consiguió acondicionar la señal mediante el uso de amplificadores operacionales para que sea receptada y procesada por el microcontrolador PIC.

Tabla 3.4 Componentes de la tarjeta del sensor de humedad

REFERENCIA	DESCRIPCIÓN
Acondicionamiento del sensor de humedad	
J2. J3	Bornera
LM358	Amplificador operacional
R1	Potenciómetro de 10kΩ
R2, R3	Resistencia 1MΩ
R4, R5	Resistencia 620kΩ
U2	Transmisor AD694AQ
C4 (104)	Capacitor cerámico de 100nF

Los voltajes generados a la salida de los amplificadores operacionales van conectados al pin 2 (RA0) y pin 3 (RA1) del PIC (temperatura y humedad relativa), respectivamente. Estos pines corresponden a los canales de conversión analógico / digital que reciben la señal y la procesan.

Adecuando la señal que entrega la termocupla y el sensor de humedad relativa de la manera detallada y utilizando el canal de conversión analógico/digital que se encuentra en el PIC, y del cual mediante algunos cálculos, se puedo obtener en forma digital el valor de la temperatura y humedad relativa medidas, capaz de poder ser mostrado en la pantalla LCD.

3.3 DIAGRAMAS CIRCUITALES

Los diagramas circuitales y los elementos utilizados en la construcción de las tarjetas diseñadas se muestran a continuación, estas fueron construidas siguiendo, en su mayoría, las recomendaciones del fabricante.

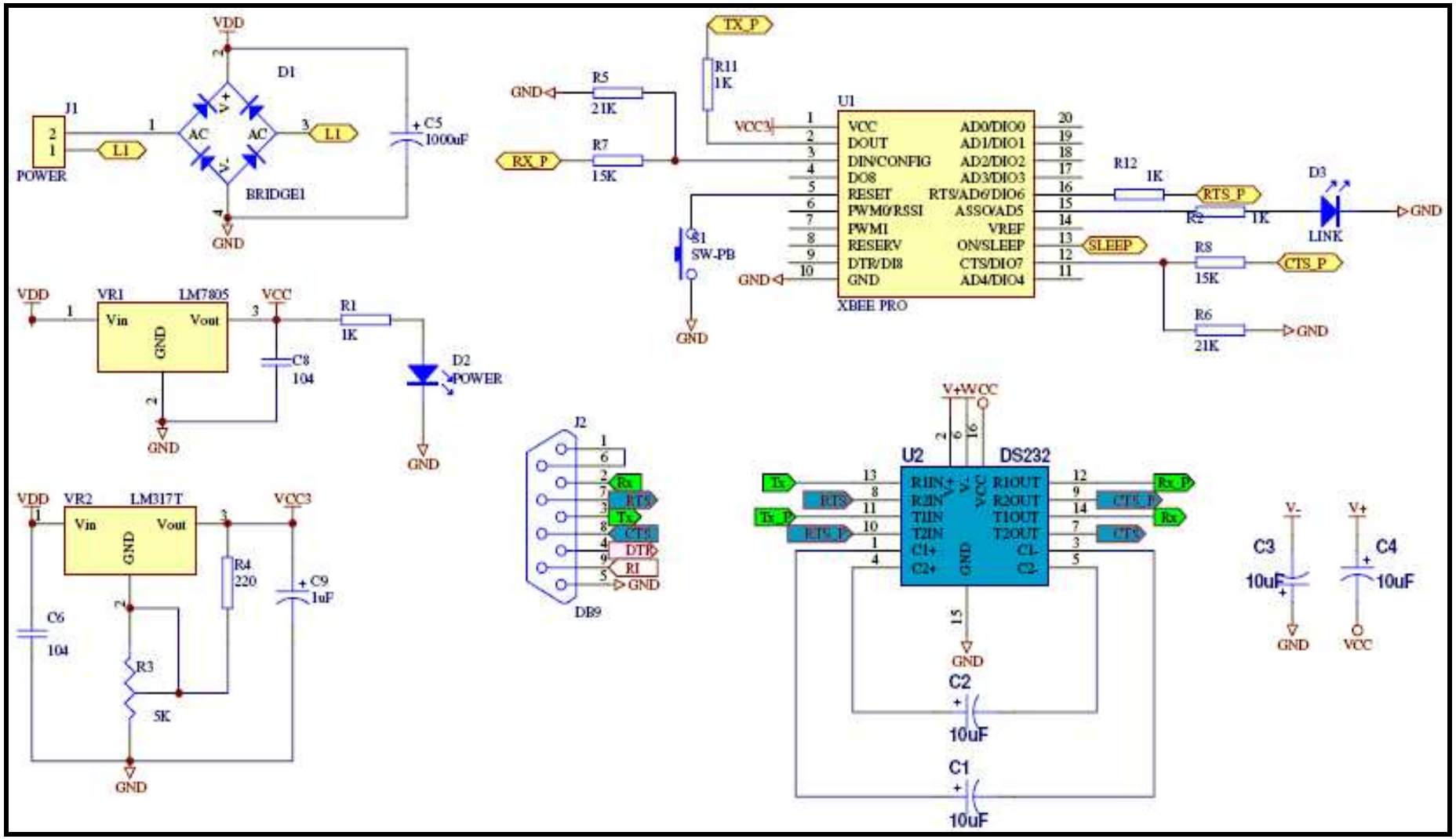


Figura 3.5 Diagrama circuital del nodo coordinador

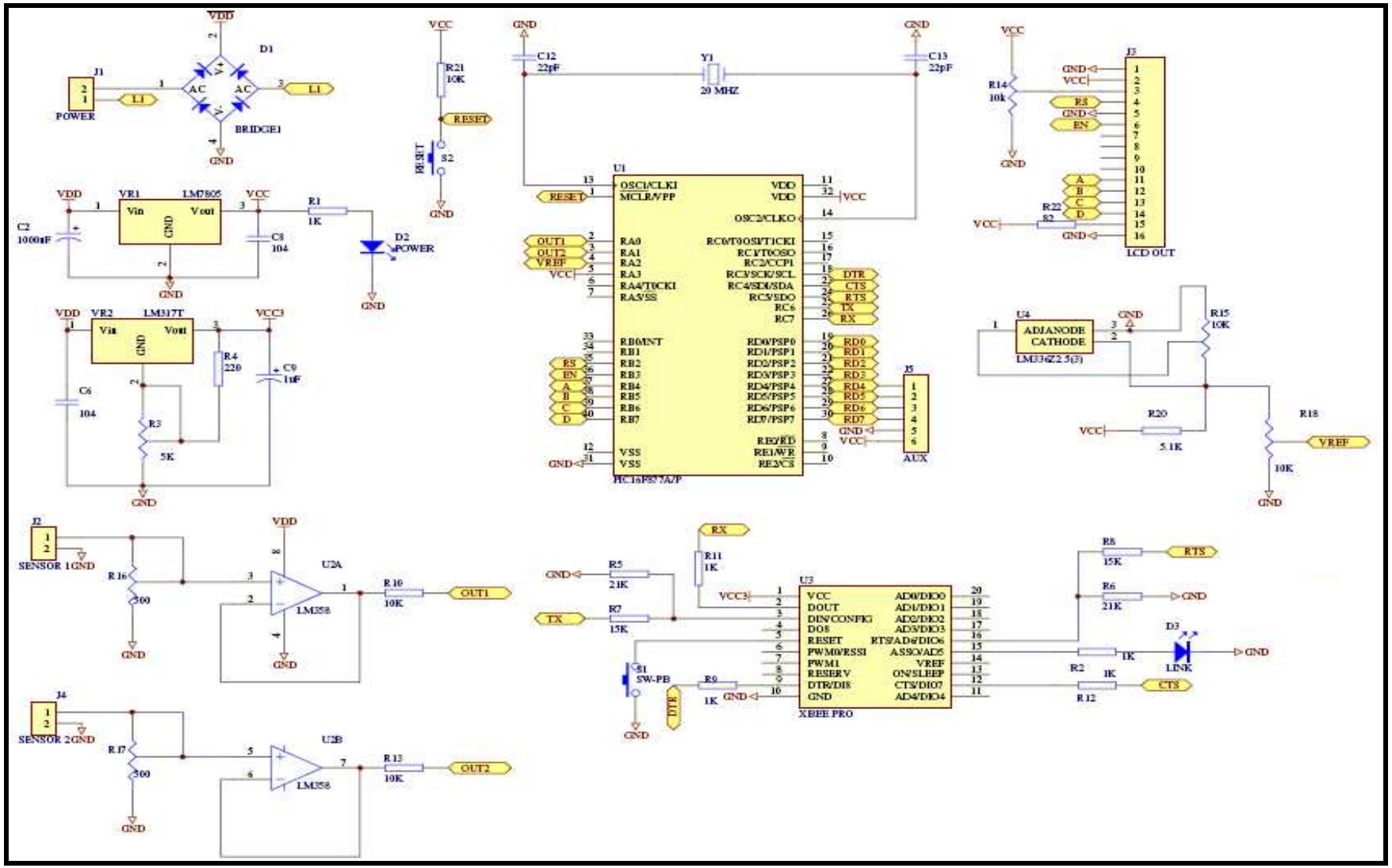


Figura 3.6 Diagrama circuital del nodo terminal

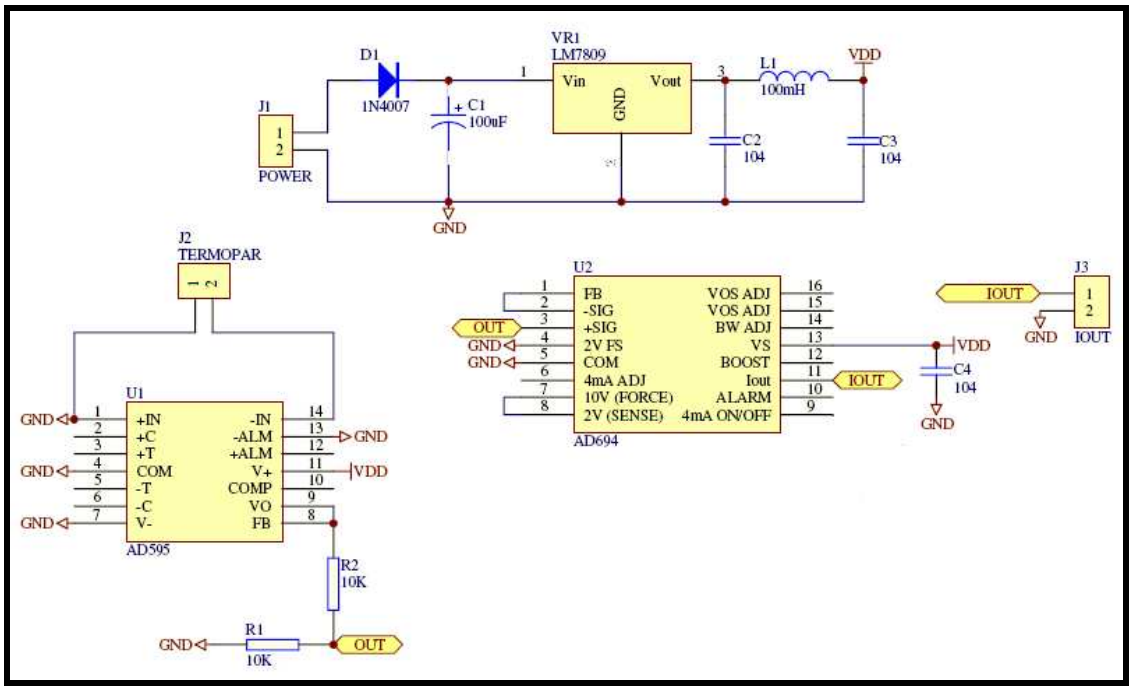


Figura 3.7 Diagrama circuital del sensor de temperatura

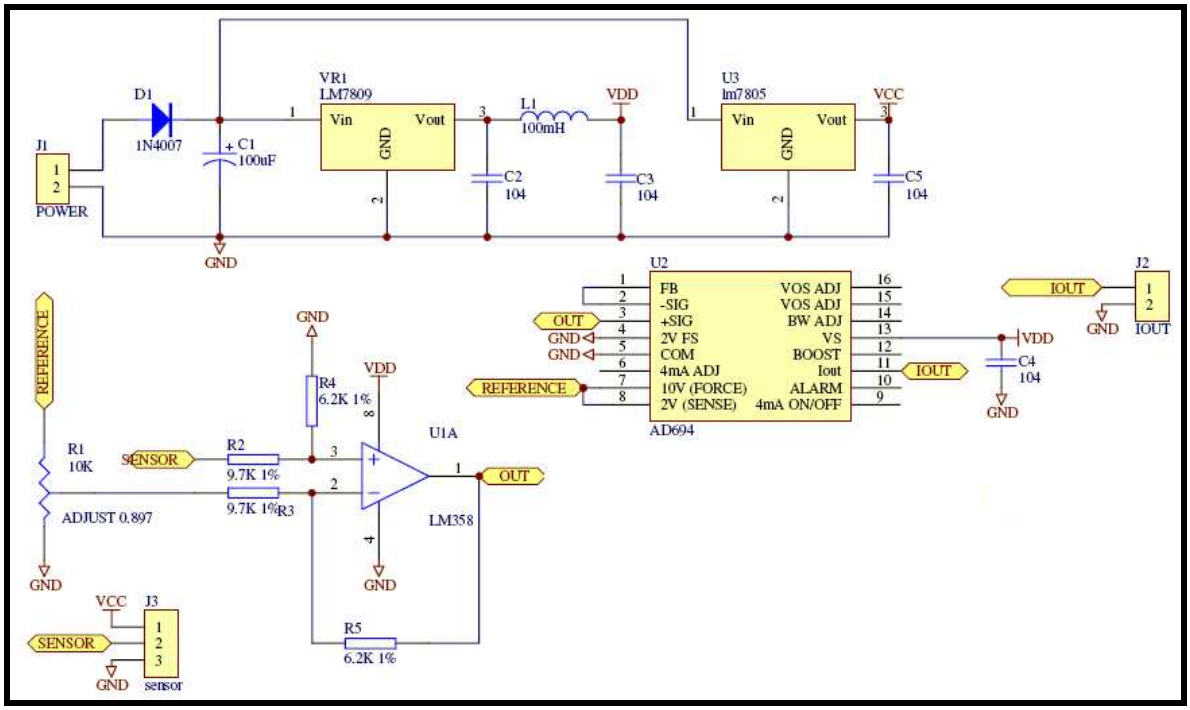
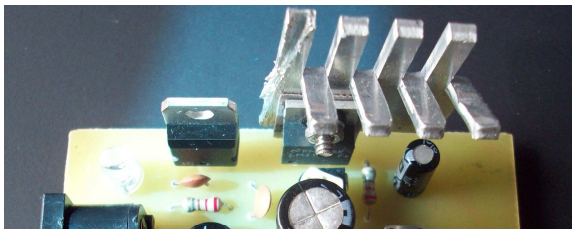


Figura 3.8 Diagrama circuital del sensor de humedad



ERROR: ioerror
OFFENDING COMMAND: image

STACK: