



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Informática
Maestría en Software Embebido

Propuesta de mejora en la transmisión y procesamiento del nivel de un tanque de gas estacionario doméstico mediante el uso del protocolo inalámbrico ZigBee

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de Maestro en Software Embebido

Presenta:

Eduardo José Rodríguez Alonso

Dirigido por:

Dr. Marco Antonio Aceves Fernández

SINODALES

Dr. Marco Antonio Aceves Fernández
Presidente

Firma

Dr. Saúl Tovar Arriaga
Secretario

Firma

M.C. Guillermo Díaz Delgado
Vocal

Firma

Dr. Juan Manuel Ramos Arreguín
Suplente

Firma

M.C. José Arturo Gaona Cuadra
Suplente

Firma

M.C. Ruth Angélica Rico Hernández
Directora de la Facultad

Dr. Irineo Torres Pacheco
Director de Investigación y
Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Septiembre 2012
México

RESUMEN

El propósito de esta investigación es definir e implementar una propuesta de sistema inalámbrico basado en radiotransmisores ZigBee para monitorear el nivel de un tanque de gas estacionario para uso doméstico. Con ello se pretende mejorar la transmisión y el procesamiento de información respecto a sistemas de monitoreo inalámbricos que no utilizan radiotransmisores ZigBee, caracterizando y comparando aspectos clave de su desempeño.

(Palabras clave: **monitor, gas, inalámbrico, ZigBee**)

SUMMARY

The purpose of this research is to define and implement a proposal of a wireless system based on ZigBee modules to monitor the level of a LP gas stationary container for a domestic household. It is intended to improve the transmission and information processing compared to similar wireless monitoring systems that don't use ZigBee transceivers, to characterize and compare key performance elements.

(Keywords: **monitor, gas, wireless, ZigBee**)

DEDICATORIA

Para Katia, Arturo y Ricardo

Con su apoyo y comprensión hicieron posible el alcanzar esta meta

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por acompañarme todos los días.

Agradezco a todos los que me ayudaron para el desarrollo de este trabajo, así como para la revisión y corrección del documento final.

Muchas gracias en especial al Dr. Marco Aceves, por su valiosa guía y su gran apoyo para la realización de esta tesis.

Fue también fundamental la guía del Mtro. Guillermo Díaz, quien con sus conocimientos y amplia experiencia permitieron mejorar este trabajo.

Agradezco asimismo a mi familia por su incondicional apoyo, por todo el tiempo que no pude dedicarles, por su paciencia.

ÍNDICE

	Página
Resumen	i
Summary	ii
Dedicatorias	iii
Agradecimientos	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE CUADROS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE ECUACIONES	xv
GLOSARIO DE TÉRMINOS y ACRÓNIMOS	xvi
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Especificación del problema a ser investigado	1
1.2. Elementos, hipótesis, teorías o preguntas a ser investigadas	2
1.3. Delimitaciones y limitaciones del estudio	2
II. MARCO TEÓRICO	3
2.1. Evolución de los sistemas de control domésticos	3
2.2. Tecnología ZigBee y sistemas de medición de nivel de gas LP	12
2.2.1. Protocolo IEEE 802.15.4 y ZigBee	12
2.2.2. Topologías de red en ZigBee	13
2.2.3. Stack del protocolo IEEE 802.15.4	15
2.2.4. Capa física (PHY) en IEEE 802.15.4	15
2.2.5. Capa de enlace de datos (Data Link) en IEEE 802.15.4	17
2.2.6. Programación de Beacons en una red IEEE 802.15.4	19

2.2.7. Proceso de asociación en IEEE 802.15.4	21
2.2.8. Asignación de direcciones en ZigBee	22
2.2.9. Enrutamiento en una red ZigBee	23
2.2.10. Transmisión broadcast en una red ZigBee	25
2.2.11. Capa de aplicación de ZigBee	26
2.2.12. Seguridad en redes ZigBee	28
2.3. Fundamentos de los tanques estacionarios de gas LP	29
2.4. Sensores de efecto Hall	31
2.5. Sistemas comerciales para monitoreo de nivel de tanques de gas LP	32
2.6. Resumen de lo que se conoce y se desconoce del área de estudio	40
2.7. La contribución que este estudio hará a la literatura citada	40
III. METODOLOGÍA	41
3.1. Metodología de Investigación	41
3.2. Procedimientos específicos	41
3.2.1. Consideraciones para el diseño del sistema propuesto	42
3.2.2. Propuesta de diseño del sistema de monitoreo	43
3.2.3. Implementación del transmisor del sistema	53
3.2.4. Implementación del display LCD del sistema (opcional para el subsistema transmisor)	61
3.2.5. Implementación del receptor del sistema	64
3.3. Instrumentación	72
3.4. Estudio Piloto	74
3.5. Recolección y tratamiento de los datos	74
IV. RESULTADOS	77
4.1. Ejecución del protocolo de pruebas	77

4.2. Análisis de varianza	78
4.3. Resultados no anticipados	81
V. CONCLUSIONES, IMPLICACIONES Y TRABAJO A FUTURO	83
5.1. Conclusiones basadas en el capítulo IV	83
5.2. Fortalezas y debilidades del estudio realizado	84
5.3. Qué se puede realizar como trabajo futuro	84
REFERENCIAS	86
APENDICE A. Conjunto de instrucciones de los microcontroladores COP8	93
APENDICE B. Transceivers con stack IEEE 802.15.4 y ZigBee	95
APENDICE C. Módulos IEEE 802.15.4 / ZigBee comercialmente disponibles	104

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Comparación de técnicas inalámbricas	7
2	Comparación de alcances de antenas en módulos XBEE	51
3	Comparación del consumo de energía en módulos XBEE	51
4	Conversión de cuentas del ADC a porcentaje de llenado del tanque de gas LP	60
5	Secuencia de recolección de datos para caracterizar el sistema propuesto	75
6	Tabla de análisis de varianza para tratamientos con dos dos factores	75
7	Datos recolectados al ejecutar el protocolo de pruebas	77
8	Datos consolidados para análisis de varianza	78
9	Tabla calculada del análisis de varianza del experimento realizado	79
A1	Registros en los microcontroladores COP8SGx	93
A2	Símbolos usados en el código de microcontroladoreCOP8SGx	93
A3	Conjunto de instrucciones de los microcontroladores COP8SGx	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Jerarquía y especialización de nodos en Inteligencia Ambiental	3
2	Ley de Moore	4
3	Almacenamiento de energía para diferentes tecnologías de baterías	5
4	Arquitectura aplicada a un ambiente automatizado	6
5	Arquitectura básica de Wi-Fi IEEE 802.11	8
6	Arquitectura de Bluetooth, celdas traslapadas	9
7	Técnica de modulación FHSS con modulación GFSK	10
8	Arquitectura de ZigBee, red de malla (mesh)	11
9	Comparación de ZigBee con otras tecnologías inalámbricas	12
10	Topologías de red soportadas por el estándar ZigBee	13
11	Pila de protocolos de ZigBee	15
12	Arreglo de canales por banda en el protocolo IEEE 802.15.4	15
13	Formato de paquetes de capa física de IEEE 802.15.4	16
14	División de la capa de enlace de datos en IEEE 802	17
15	Estructura de beacons en ZigBee	17
16	Mecanismo de Acceso CSMA/CA	18
17	Estructura de una supertrama en IEEE 802.15.4	19
18	Colisiones de beacons: (a) Directo ; (b) Indirecto	20
19	Proceso de asociación en IEEE 802.15.4	21

20	Cálculo de direcciones en una red ZigBee	23
21	Descubrimiento de rutas en una red ZigBee	24
22	Transmisión <i>broadcast</i> en una red ZigBee	26
23	Pila de protocolos de ZigBee	27
24	Claves de cifrado ZigBee en modos residencial y comercial	29
25	Almacenamiento del gas LP en un tanque estacionario doméstico	30
26	Mecanismo del flotador de un tanque de gas LP estacionario	31
27	Gaslow 1500	33
28	Gas Watch II GW-212E	33
29	Rochester TwinSite TS012	34
30	Rochester Elga 3340-0001	35
31	Centeron RSI-33521	36
32	Centeron RSI-12333	37
33	RobertShaw RS-228	37
34	MideGasP : (a) Indicador ; (b) Sensor de nivel de gas	38
35	CuentaGas : (a) Analógico ; (b) Digital	39
36	Diagrama a bloques del sistema de monitoreo propuesto	44
37	Arquitectura de los microcontroladores COP8SAx/SGRx	46
38	Pinout de los microcontroladores COP8SAA720, COP8SGR728	46
39	Acoplamiento de señales 3.3V – 5V para módulos XBEE	47
40	Sparkfun XBEE USB Explorer	48

41	Aplicación Digi X-CTU para configurar los módulos Digi XBEE	49
42	Configuración de parámetros de operación de módulos Digi XBEE : (a) Coordinador ; (b) Enrutador/End Device	50
43	Patrón de radiación de antena tipo whip del módulo XBEE-Pro	52
44	Patrón de radiación de antena tipo chip del módulo XBEE	52
45	Diagrama funcional del transmisor del medidor de nivel de gas LP	53
46	Tareas básicas del software del transmisor	54
47	Diagrama de inicialización del transmisor	54
48	Diagrama de Flujo para espera entre lecturas del transmisor	55
49	Diagrama de flujo de limpieza de display del transmisor	56
50	Proceso de conversión del ADC0831C	56
51	Diagrama de flujo de lectura del sensor de efecto Hall del transmisor	57
52	Algoritmo de conversión lectura a dígitos del transmisor	58
53	Envío de dígitos por SwUART al módulo XBEE-Pro y por puerto serial	59
54	Implementación del circuito del transmisor sin el LCD opcional	61
55	Tareas básicas del software del controlador del display LCD	61
56	Rutinas de retardo del controlador de display LCD	62
57	Rutina para enviar comandos al display LCD	62
58	Rutina de recepción de comandos del display LCD	63
59	Rutina de configuración de pines del display LCD	63

60	Implementación del circuito del display LCD opcional	64
61	Diagrama funcional del receptor del sistema de monitoreo de nivel de gas LP	64
62	Tareas básicas del software del receptor	65
63	Rutina de inicialización del receptor	65
64	Diagrama de flujo de inicialización del display LCD del receptor	66
65	Rutina de espera inicial del receptor XBEE	67
66	Rutinas de retardo utilizadas en el software del receptor	67
67	Diagramas de flujo para el despliegue de lectura del receptor	68
68	Rutina de lectura UART del receptor	69
69	Rutina de despliegue de lectura en display LCD del receptor	70
70	Implementación del circuito del receptor	70
71	Sistema de medición propuesto en operación normal: (a) Subsistema de medición y transmisión ; (b) Subsistema de recepción y monitoreo	71
72	Instrumentación de prueba del receptor propuesto con un analizador lógico	72
73	Lectura periódica en el receptor y comandos para display LCD	73
74	Decodificación UART_Rx en el receptor del sistema y envío de datos al LCD en forma serial	73
75	Gráfica de interacción para las lecturas obtenidas	79
76	Gráfica de efectos principales para las lecturas obtenidas	80
77	Gráfica de residuos para las lecturas obtenidas	80
B1	Diagrama a bloques del transceiver ZMD ZMD44102	95

B2	Pinout del transceiver ZMD ZMD44102	95
B3	Circuito de aplicación típico del transceiver ZMD ZMD44102	96
B4	Diagrama a bloques del transceiver Atmel AT86RF230	96
B5	Pinout del transceiver Atmel AT86RF230	97
B6	Circuito de aplicación típico del transceiver Atmel AT86RF230	97
B7	Diagrama a bloques del transceiver TI/Chipcon CC2420	98
B8	Pinout del transceiver TI/Chipcon CC2420	98
B9	Circuito de aplicación típico del transceiver TI/Chipcon CC2420	99
B10	Diagrama a bloques del transceiver Freescale MC13193	99
B11	Pinout del transceiver Freescale MC13193	100
B12	Circuito de aplicación típico del transceiver Freescale MC13193	100
B13	Diagrama a bloques del transceiver Freescale MC13213	101
B14	Pinout del transceiver Freescale MC13213	101
B15	Diagrama a bloques del transceiver Microchip MRF24J40	102
B16	Pinout del transceiver Microchip MR24J40	102
B17	Circuito de aplicación típico del transceiver Microchip MR24J40	103
C1	Diagrama a bloques del módulo MaxStream XBEE / BEE-Pro	104
C2	Pinout de los módulos MaxStream XBEE / XBEE-Pro	104
C3	Diagrama de aplicación módulos MaxStream XBEE / XBEE-Pro	105
C4	Módulo Cirronet ZN241Z IEEE 802.15.4	105

C5	Tarjeta de desarrollo Silicon Labs 2.4 GHz 802.15.4	106
C6	Tarjeta de desarrollo ZigBee Renesas-M30280FA	106
C7	Diagrama a bloques del módulo Panasonic PAN802154HAR00	107
C8	Diagrama a bloques del módulo DLP Design DLP-RF2-Z-G-G	107
C9	Diagrama a bloques del módulo Microchip MRF24J40MC	108
C10	Pinout y conexión del módulo Microchip MRF24J40MC	108
C11	Pinout y conexión del módulo Telegesis ETRX357	109

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación		Página
2.1	Cálculo de parámetro Cskip en una red ZigBee	22
2.2	Cálculo de dirección de un enrutador hijo en una red ZigBee	22
2.3	Cálculo de dirección de un end device hijo en una red ZigBee	22
3.1	Suma de cuadrados entre medias marginales factor A	76
3.2	Suma de cuadrados entre medias marginales de B	76
3.3	Suma de cuadrados de la interacción AB	76
3.4	Suma de cuadrados total	76
3.5	Suma de cuadrados error experimental	76

GLOSARIO DE TÉRMINOS Y ACRÓNIMOS

AES 128-bit. (Advanced Encryption Standard). Estándar de cifrado adoptado por diversas agencias gubernamentales, y ampliamente utilizado en redes inalámbricas debido a su seguridad y alto desempeño. Utiliza claves de 128 bits. [43]

Analizador Lógico. Instrumento usado para desplegar los estados lógicos de varias señales digitales en una escala de tiempo. Permite analizar los datos digitales, y puede representar los datos como ejecución de software en tiempo real, valores de flujo de datos, secuencias de estados, etc. [44]

AODV. (Ad-Hoc On-Demand Distance Vector). Protocolo de enrutamiento que habilita enrutamiento multi-nodos entre los nodos participantes de una red. Se basa en el algoritmo del vector de distancia. [45]

API. (Application Program Interface). Es el conjunto de comandos, funciones y protocolos que pueden ser usados por los programadores al desarrollar software para un sistema específico. [19]

Arquitectura Harvard Modificada. Diseño de arquitectura de un microcontrolador en la que la memoria RAM utiliza espacio y buses de direcciones independientes de la memoria EPROM, lo cual permite transferir datos de EPROM a RAM. [16]

BPSK. (Binary Phase-Shift Keying). Modulación de fase de 2 estados, en la que un cero lógico es codificado como un desplazamiento de fase de 0° , y un uno lógico es representado por un desplazamiento de fase de 180° . [5]

Casa Inteligente. Casa equipada con cableado estructurado especial que permite a los ocupantes el controlar remotamente o programar un conjunto de dispositivos electrónicos domésticos. [4]

Cifrado. Transformación de un mensaje de modo que su contenido no pueda ser descifrado sin el conocimiento del algoritmo empleado y sus claves asociadas. [5]

Comandos AT. Lenguaje de comandos de texto, originalmente desarrollado para el modem Hayes, y aún usado para interactuar con la mayoría de los módems. [19]

Comandos HD44780. Especificación de la interface de comandos utilizada por dispositivos de 4 y 8 bits para controlar displays LCD alfanuméricos de hasta 4 líneas, definiendo un conjunto de caracteres comunes y otros generados por el usuario. Se implementó en el controlador Hitachi HD44780, de ahí su nombre. [46]

Convertidor ADC. Componente electrónico que convierte una señal analógica (típicamente voltaje) en valores digitales expresados por una serie de bits que representan un número proporcional al valor de la señal analógica medida. [18]

Costo de Trayectoria. Suma de los costos (distancias) de transmisión que un mensaje requiere para ser enviado a través de una serie de nodos hasta alcanzar el destino deseado. [9]

CSMA/CA. (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). Método de acceso aleatorio a un canal de comunicación, basado en el sensado de portadora y en evitar colisiones. Es utilizado en redes de tipo IEEE 802.11. [5]

Diseño de Experimentos. Planeación de un conjunto de pruebas experimentales, con el fin de analizar estadísticamente los datos generados y obtener conclusiones objetivas y válidas sobre un sistema o proceso. [21]

Display LCD. (Liquid Crystal Display) Componente electrónico utilizado para desplegar caracteres alfanuméricos en una pantalla de cristal líquido. Recibe comandos de configuración y los datos a desplegar mediante una interface paralela conectada a un microcontrolador. [47]

Dispositivos Nomádicos. Comprenden sistemas de comunicación (teléfonos móviles), de “infotainment” (radios, reproductores personales de CD, MP3 o DVD), y de navegación (GPS). [5]

Domótica. (DOMus infOrmaTICS). Integración de distintas tecnologías en el hogar mediante el uso simultáneo de la electricidad, la electrónica, la informática y las telecomunicaciones, con el fin de mejorar la seguridad, el confort, las comunicaciones, el ahorro energético, facilitar el control integral de los sistemas para los usuarios y ofrecer nuevos servicios. [1]

DSSS. (Direct Sequence Spread Spectrum). Técnica de codificación de señales, en la que cada bit a transmitir se modula utilizando la técnica PSK (Phase Shift Key) siguiendo una secuencia específica de bits conocida como chips. [27]

FHSS. (Frequency Hopping Spread Spectrum). Tecnología de codificación de señales, con poca influencia de ruido electromagnético, en la que la frecuencia de la portadora es periódicamente modificada utilizando la técnica FSK (Frequency Shift Key), siguiendo una secuencia preestablecida. [27]

GFSK. (Gaussian Frequency-Shift Keying). Técnica de modulación basada en desplazamiento de frecuencia que utilice un filtro Gaussiano para dar forma a los pulsos antes de ser modulados, lo cual reduce el ancho de banda espectral así como el uso de ancho de banda fuera del canal empleado. [47]

ISM. (Industrial, Scientific and Medical). Bandas de radiofrecuencia reservadas internacionalmente para aplicaciones distintas a las comunicaciones. Los dispositivos que operan en dichas bandas típicamente generan interferencia electromagnética. En algunas de estas bandas operan Bluetooth, ZigBee, Wi-Fi y otros debido a que no requieren licencia de uso del espectro electromagnético. [5]

Interface Serial Microwire. Especificación que define un protocolo de comunicación serial de 3 hilos entre dos o más dispositivos electrónicos (microcontroladores, memorias, convertidores, etc). [48]

LGA. (Land Grid Array). Tecnología de empaque de circuitos integrados con un arreglo cuadrado de contactos en la parte inferior del empaquetado, que permite colocarlo en un socket, o soldarlo directamente en un circuito impreso. [35]

Mesh Networks. (Redes de malla). Topología de red multipunto a multipunto que permite el establecimiento de rutas alternas entre nodos cuando las trayectorias originales se encuentran bloqueadas. [7]

Modelo OSI. (Open System Interconnection). Modelo de capas, cada una dedicada a funciones específicas, describiendo la comunicación entre sistemas abiertos. [5]

OFDM. (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing). Técnica de modulación multiportadora usada en sistemas IEEE 802.11a/g e Hiperlan 2. [5]

O-QPSK. (Offset Quadrature Phase-Shift Keying). Técnica de modulación que utiliza 4 desplazamientos de fase para codificar 2 bits por símbolo. [5]

OTP. (One-Time Programmable). Tipo de memoria en un componente electrónico que permite efectuar una sola vez la grabación de los datos. Se usa principalmente durante el desarrollo de prototipos, pues es una alternativa práctica y económica a las versiones ROM de los componentes electrónicos. [5]

Powerline. Estándar industrial para la transmisión de datos y señales de control usando líneas de energía. Más conocido por su nombre comercial HomePlug. [47]

Profundidad de Red. Longitud de la ruta más larga desde el nodo de orden mayor en la red hasta el nodo con el orden menor. [9]

PWM. (Pulse Width Modulation). Método que utiliza el ancho de un pulso eléctrico para codificar o modular una señal. El ancho el pulso es una función de la amplitud de la señal original. [47]

QFN. (Quad, flat, no-lead). Tipo de empaque de circuitos integrados de forma cuadrada y que no tiene pines sobresalientes. [47]

QLP. (Quad Leadless Package). Tipo de empaque de circuitos integrados de forma cuadrada sin pines sobresalientes, con área expuesta para mejor disipación de calor. [33]

RFID. (Radio Frequency Identification). Método de identificación de objetos que usa radiofrecuencia para leer el número de ID único contenido en un *transponder*. [47]

RS232. Interface serial asíncrona para comunicación a distancias de centenas de metros. Utiliza un cable para transmitir, otro para recibir y un cable de tierra (común), además de algunas señales de control y de temporización. [47]

Sensitividad. Potencia mínima de la señal de entrada en la antena, necesaria para producir una señal 20dB mayor que el ruido en las terminales de salida. [47]

Sensor de Efecto Hall. Sensor que utiliza una tecnología de estado sólido que mide la desviación del flujo de electrones a través de un semiconductor, causada por el magnetismo de un imán. Típicamente el sensor de efecto Hall produce como salida una señal de voltaje, la cual será luego procesada por otro componente. [13]

SPI. (Serial Peripheral Interface). Interface serial síncrona maestro-esclavo de 3 cables desarrollada por Motorola. Consta de las señales Serial Data Input (MOSI), Serial Data Output (MISO) y Serial Clock (SCK). [47],[49]

Stack. Conjunto de capas jerárquicas de software requeridas tanto en el transmisor como en el receptor para llevar a cabo la comunicación en una red. [5]

SwUART. Implementación en software del controlador de la interface de hardware para emular el dispositivo UART. [47]

Transceiver. Componente electrónico que realiza la modulación y transmisión, así como la recepción y demodulación de datos recibidos por canales digitales en un bus alámbrico o inalámbrico. [50]

Transponder. : Módulo de hardware que al ser sometido a la acción de un campo eléctrico, transmite de manera inalámbrica un número de ID único contenido en dicho módulo. [47]

UART. (Universal Asynchronous Receiver Transmitter). Interface asíncrona de hardware para convertir datos paralelos a seriales y transmitirlos, así como para convertir datos seriales recibidos a datos paralelos. Define parámetros como tiempos de espera, anchos de pulso de bits, velocidad de transmisión, paridad del mensaje, bits de inicio y parada. [47]

Voltaje Radiométrico de Salida. Voltaje de salida que exhibe el nivel de una señal circunscrita de manera proporcional a un rango de voltaje de referencia previamente establecido. [13]

Wi-Fi. Estándar de comunicación inalámbrica para redes de área locales, soportadas por la especificación IEEE 802.11. [5]

WPAN. (Wireless Personal Area Network). Red inalámbrica de proximidad, con un extensión pequeña. [5]

WSN. (Wireless Sensor Network). Conjunto de nodos de sensores que trabajan juntos recopilando, procesando y enviando información de manera inalámbrica a dispositivos seleccionados. [43]

ZDO. (ZigBee Device Object). Protocolo integrante de la pila de protocolos de ZigBee, responsable del manejo global del dispositivo, y de proveer las contraseñas de seguridad y aplicación de políticas. Es una aplicación que reside en todos los nodos ZigBee. Maneja su propio perfil conocido como ZDP (ZigBee Device Profile) hacia el cual es referenciado por la aplicación final. [5]

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Especificación del problema a ser investigado

Ante la creciente necesidad de integrar una mayor cantidad de información a los *sistemas domóticos*, principalmente con el fin de aumentar la seguridad y la comodidad en el hogar, se ha observado que algunos dispositivos domésticos no cuentan con un mecanismo adecuado para poder incorporarse a los sistemas de control y monitoreo, los cuales constituyen el fundamento de una *casa inteligente*.

Las casas y edificios inteligentes ofrecen mejoras a la calidad de vida de sus habitantes, por lo cual es importante implementar sistemas que incorporen una mayor cantidad de información y así ofrecer mayor bienestar a los usuarios.

Con este trabajo se busca incrementar la fiabilidad de la transmisión y reducir el consumo de energía durante el proceso de transmisión inalámbrica y procesamiento de datos referentes al nivel de un tanque de gas estacionario doméstico, mediante el uso de sistemas de transmisión que incorporen técnicas de ultra bajo consumo de energía. Esto podría permitir su aplicación a nivel masivo en sistemas domóticos comerciales.

En particular se busca determinar las ventajas y desventajas de usar radiotransmisores ZigBee para transmitir el nivel de un tanque de gas estacionario doméstico medido con un *Sensor de Efecto Hall*, aplicando técnicas de diseño de experimentos para las mediciones y análisis requeridos, las cuales permitirán generar resultados más robustos y fiables al emplear metodologías y herramientas estadísticas especializadas.

1.2. Elementos, hipótesis, teorías o preguntas a ser investigadas

Con este trabajo se busca determinar si el uso de técnicas de ultra bajo consumo de energía, como lo es ZigBee, permite implementar sistemas de monitoreo de nivel de tanques de gas estacionario que ofrezcan ventajas respecto a sistemas inalámbricos similares existentes que no utilizan este tipo de tecnología de transmisión de datos.

Se analizarán aspectos relacionados con la seguridad e integridad de los datos transmitidos, el alcance de la señal, la integración con sistemas domóticos, la facilidad de instalación y configuración, la relación del costo total del sistema respecto a las funciones que ofrece, así como las características adicionales que se pueden integrar al sistema de captura y procesamiento de datos.

1.3. Delimitaciones y limitaciones del estudio

Como parte de este estudio no se probará el aspecto físico de la transmisión inalámbrica, pues no se intenta modificar los tiempos, formas de señal o parámetros de niveles de las señales radiadas, ni se busca utilizar equipos especializados para medir intensidad de señal o patrones de señales transmitidas.

Tampoco se probará la seguridad de uso del prototipo en ambientes volátiles, pues el diseño del prototipo se enfocará en la transmisión fiable de los datos. Los cambios en el diseño tendientes a cumplir con diferentes certificaciones y regulaciones de seguridad serán necesarios en caso de buscar la comercialización del prototipo.

A lo largo de este trabajo se hablará del protocolo ZigBee y de los sistemas de medición de gas, y se describirá la implementación de un prototipo de transmisión y recepción del nivel de un tanque de gas estacionario doméstico, analizando su rendimiento mediante técnicas de diseño de experimentos.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Evolución de los sistemas de control domésticos

El inicio del siglo XXI se caracteriza por avances espectaculares en tecnologías de comunicaciones y computacionales, los cuales abren la ventana a un mundo donde múltiples dispositivos electrónicos se convierten en parte integral de nuestra vida diaria.

Una red de sensores integrados entre sí crea un ambiente de “conciencia contextual” al registrar y comunicar eventos y datos personales al sistema de control doméstico, quien los combina para proveer respuestas significativas para el usuario. En este ambiente las funciones se organizan en redes para proveer al ser humano servicios de comunicación y entretenimiento donde quiera que se encuentre. A este mundo se le conoce como “Inteligencia Ambiental”. [1]

La Inteligencia Ambiental define diferentes tipos de nodos para interactuar con el sistema de control, como se observa en la Figura 1. Dichos nodos se caracterizan por su consumo de energía y por el tipo de aplicación que proveen.

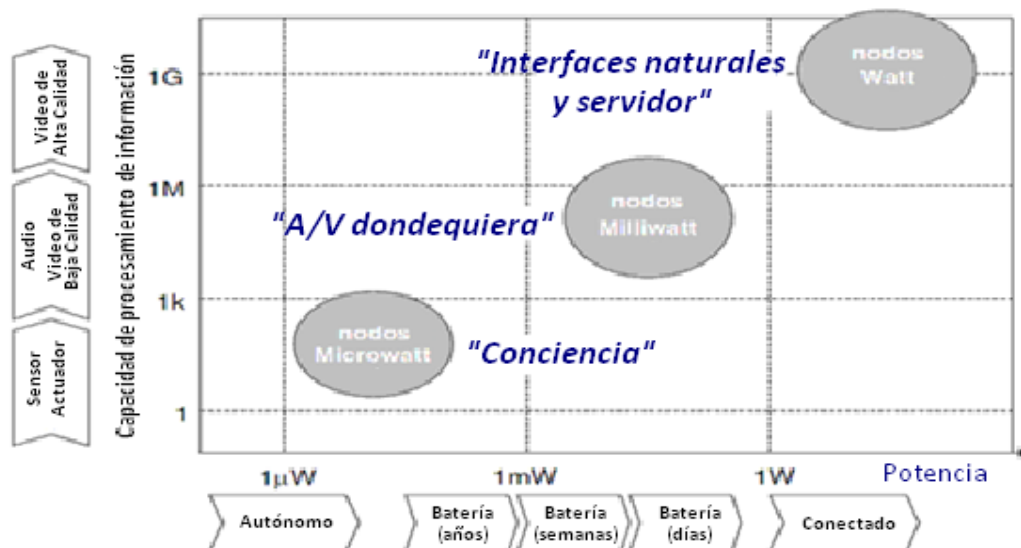


Figura 1. Jerarquía y especialización de nodos en Inteligencia Ambiental [1]

Los nodos que pueden transmitir información a tasas mayores consumen asimismo una mayor cantidad de energía, lo cual agota más rápidamente las baterías que alimentan a dichos nodos, o inclusive pueden requerir que permanezcan siempre conectados al suministro eléctrico. Los nodos con menor tasa de transmisión son los que transmiten información de sensores y actuadores, los cuales requieren una cantidad mínima de energía para funcionar, pudiendo durar años operando con baterías.

Existen algunos factores que han contribuido al desarrollo de la Inteligencia Ambiental, tales como el incremento en la densidad y velocidad de los circuitos integrados, una mayor eficiencia energética en las comunicaciones inalámbricas, así como una marcada disminución en los costos.

La ley de Moore caracteriza estas tendencias de reducción de costos e incremento de prestaciones, reduciéndose a la mitad los costos aproximadamente cada 18 meses, lo cual permite incorporar elementos más potentes y de menor costo en los diseños de los sistemas de control. Esto se muestra en la Figura 2.

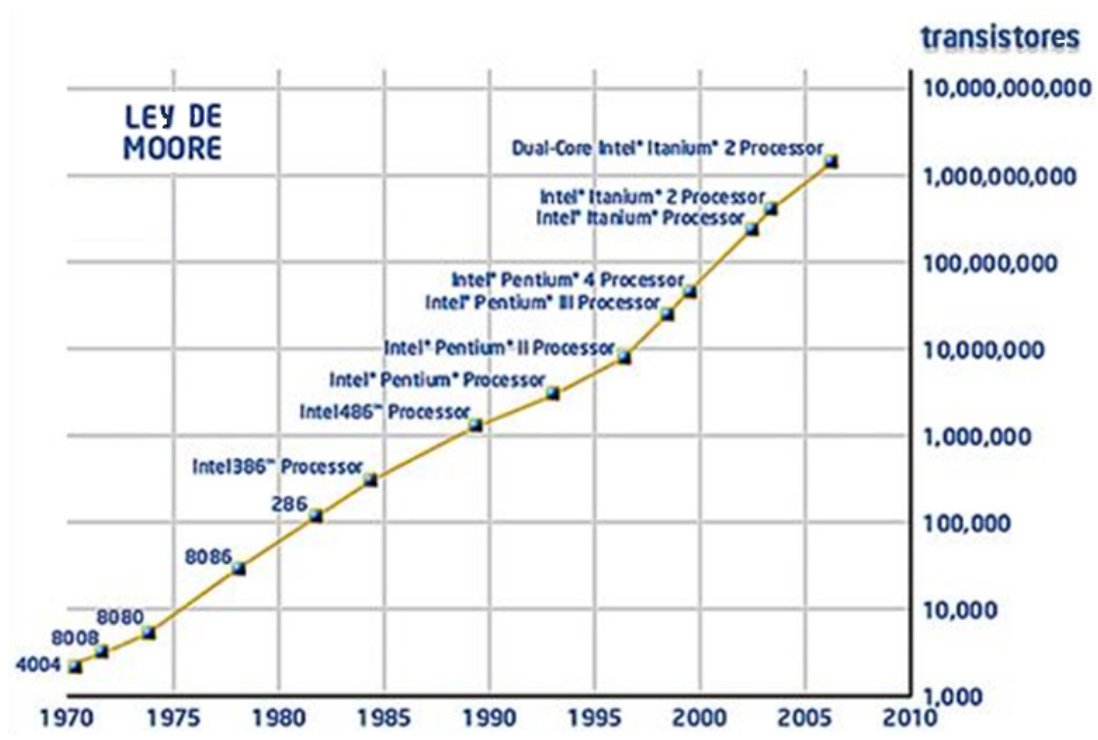


Figura 2. Ley de Moore [5]

Sin embargo, las tecnologías de almacenamiento de energía no han evolucionado al mismo ritmo que los componentes electrónicos. Sus avances se miden en décadas y los costos no se reducen rápidamente. Para que el concepto de Inteligencia Ambiental se vuelva realidad es necesario que las baterías puedan almacenar mucha mayor cantidad de energía en menores volúmenes y a costos más reducidos. En la Figura 3 se pueden observar las diferencias en capacidad de almacenamiento de energía de diferentes tecnologías de baterías. [5]

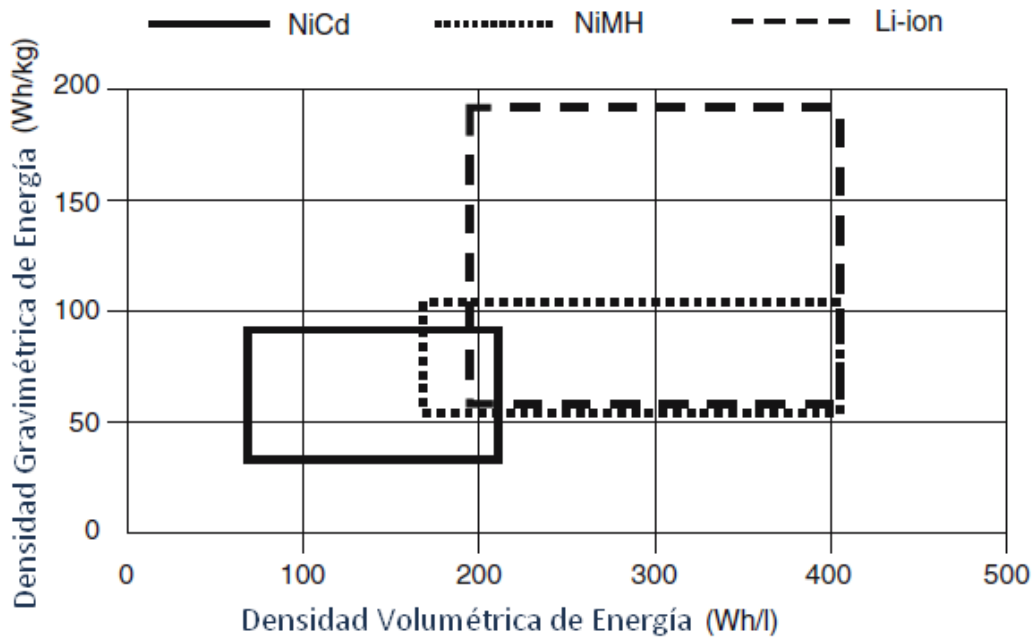


Figura 3. Almacenamiento de energía para diferentes tecnologías de baterías [5]

Algunas tecnologías clave para el concepto de Inteligencia Ambiental son: *RFID (Identificación por Radio Frecuencia)* que utiliza *transponders* personales y lectores distribuidos, *Wi-Fi* que proporciona un enlace inalámbrico de datos entre dispositivos electrónicos, así como sensores y elementos de automatización basados en protocolos de ultrabajo consumo de energía. En la Figura 4 se muestra esta arquitectura, en la que se conectan mediante Wi-Fi a la red de área local los diferentes elementos del sistema de control doméstico, recibiendo y procesando las lecturas de los transponders para controlar los accesos y la iluminación de acuerdo a la ubicación de los usuarios. [2]

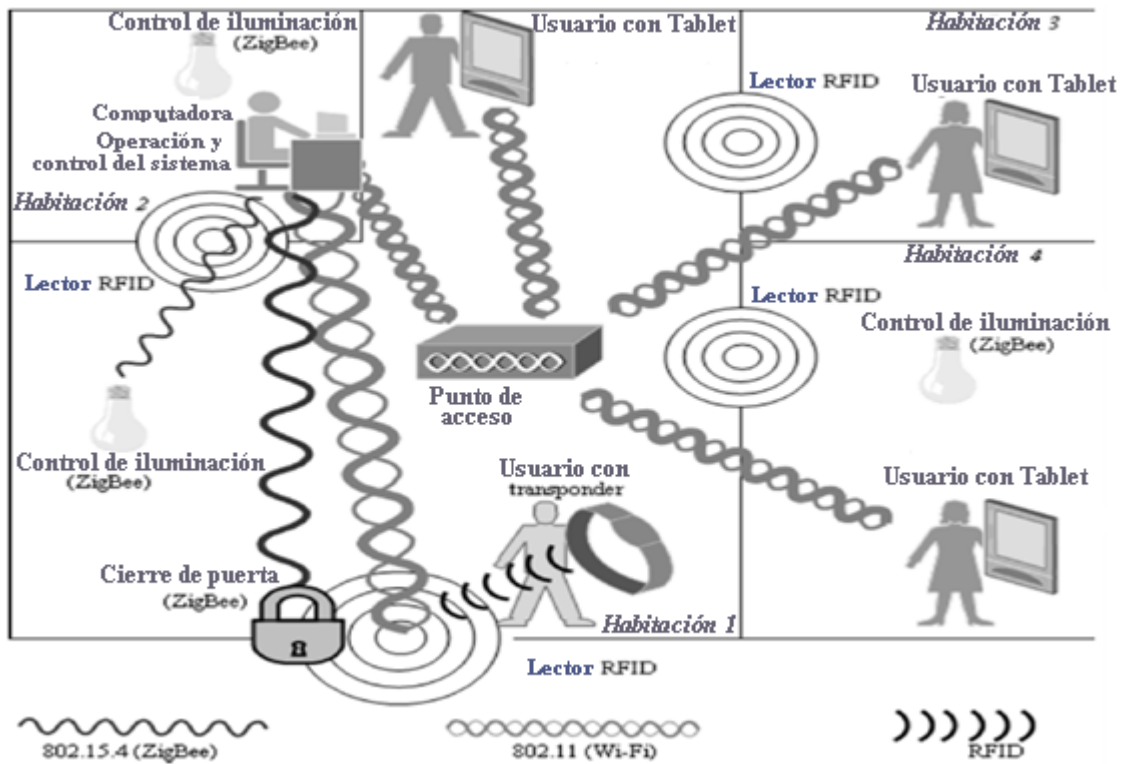


Figura 4. Arquitectura aplicada a un ambiente automatizado [2]

Tradicionalmente los sistemas de automatización domésticos se enfocaron a controlar los sistemas de ventilación y calefacción, sistemas de seguridad y de control de iluminación. Sin embargo estos sistemas no consideraban el integrar dispositivos electrodomésticos o el transporte de señales de audio y video; además de implementarse como sistemas independientes y no compatibles con los sistemas desarrollados por fabricantes distintos.

A partir de 1999 se da un impulso significativo a los sistemas de control domésticos, pues muchas compañías aprovechan los avances de las tecnologías de información y comunicación para trabajar en la intercomunicación entre dispositivos. Con esto se busca generar un estilo de vida más conveniente, con mayores funciones electrónicas en el hogar, y enfocado a optimizar el consumo de energía. Así es como surge el concepto de la "casa inteligente", conjuntando sistemas de control, de entretenimiento y redes computacionales domésticas.

Ante la creciente complejidad derivada de interconectar un número cada vez mayor de dispositivos que formarán parte de la “casa inteligente”, las tecnologías inalámbricas se presentan como la mejor elección al compararlas con esquemas de cableado tradicionales o soluciones de transmisión de datos sobre líneas eléctricas (*powerline*), pues el balance entre ventajas y desventajas es favorable a las tecnologías inalámbricas. [3]

Se han estudiado diferentes soluciones inalámbricas para la transmisión de datos en casas inteligentes, tales como Wi-Fi, Bluetooth, WLAN, IrDA, ZigBee, HomeRF entre otras. Una comparación de dichas técnicas se muestra en el Cuadro 1. [4]

Cuadro 1. Comparación de técnicas inalámbricas [4]

	Zigbee	Bluetooth	Infrared	HomeRF	WLAN
Alimentación	Baterías	Baterías	AC	AC	AC
Frecuencia (Hz)	868/915 M, 2.4 G	2.4 G	820 nm	2.4 G	2.4 G
Corriente en reposo (A)	10 m/1u	40 m/10 u	20 m	100 m/5 u	250 m
Velocidad de transmisión (bps)	40/250 K	1 M	4/11 M	11 M	11/54 M
Consumo relativo de energía	1-10	> 10	> 10	> 20	> 50
Distancia visible (m)	100	10	50	50	150

En 1990 se forma el grupo de trabajo IEEE 802.11, enfocado a la estandarización de las redes locales inalámbricas. En 1997 se ratifica el estándar IEEE 802.11a, el cual inicialmente definió tasas de transmisión de 1 y 2 Mbps, operando en las frecuencia ISM (Industrial, Científica y Médica) de 2.4 y 5.8 GHz. Debido a las limitaciones en la tasa de transmisión, se desarrolla el estándar IEEE 802.11b, llegando a los 5.5 y 11 Mbps, lo cual detonó su aplicación en múltiples sectores del mercado. El término utilizado para referirse a los productos certificados en IEEE 802.11b es Wi-Fi. [5]

Wi-Fi utiliza diferentes técnicas de modulación, como *OFDM (Multiplexación Ortogonal por División de Frecuencia)*, *FHSS (Distribución Espectral de Saltos en Frecuencia)* y *DSSS (Secuencia Directa de Saltos en Frecuencia)*. Surgen posteriormente más recomendaciones por parte del grupo de trabajo de IEEE 802.11, como la IEEE 802.11g (3G), con la que se logran hasta 54 Mbps y la IEEE 802.11n (4G) la cual permite hasta 600 Mbps); estas últimas progresivamente están desplazando a 802.11b, debido al incremento en la tasa de transmisión.

En la Figura 5 se muestra la arquitectura básica de Wi-Fi. Los dispositivos inalámbricos clientes se conectan a la red de área local mediante los puntos de acceso, los cuales están conectados mediante cableado a la red fija. Al conjunto de los dispositivos inalámbricos y su correspondiente punto de acceso se le conoce como Conjunto de Servicio Básico.

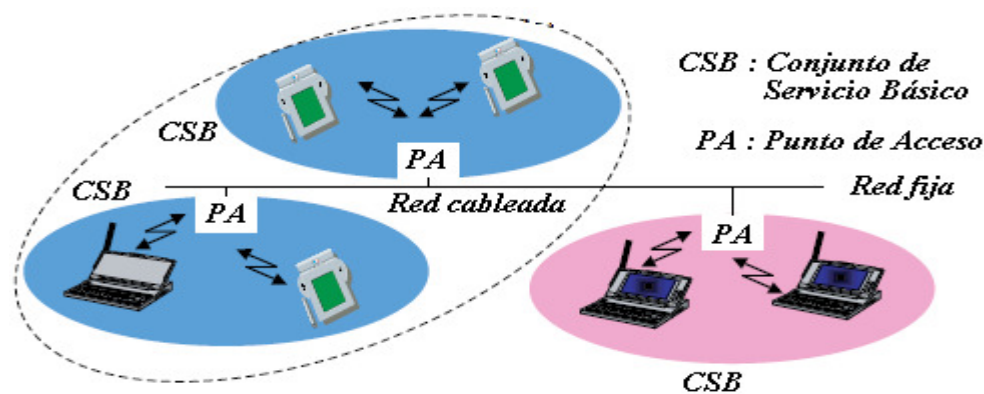


Figura 5. Arquitectura básica de Wi-Fi IEEE 802.11b [5]

Wi-Fi se ha usado principalmente como una extensión de las redes de área local, para interconectar edificios, proporcionar acceso a datos mediante Internet u otras redes en áreas abiertas como aeropuertos, bodegas y tiendas, y brindar acceso a *dispositivos nomádicos*. En ambientes de automatización se requiere que los dispositivos a controlar cuenten con un receptor / transmisor Wi-Fi.

Entre las desventajas de Wi-Fi se cuentan la influencia de obstáculos fijos como paredes metálicas, uso compartido del ancho de banda con otros emisores, ataques de seguridad y falta de control sobre la calidad de la señal. [5]

Bluetooth es una tecnología inalámbrica orientada principalmente a intercomunicar diversos dispositivos con un corto alcance y a muy bajo costo. Fue desarrollada en 1994 por la compañía Ericsson. En 1998 se establece un Grupo de Interés Especial (*SIG*) con muchas otras compañías, generando el estándar Bluetooth. IEEE lo referencia de modo accesorio como IEEE 802.15.1. Se utiliza principalmente en telefonía celular, aunque su uso se expande a accesorios computacionales, laptops, audífonos, sistemas de audio, cámaras y aplicaciones automotrices. A cada aplicación se le denomina perfil (*profile*) y contiene detalles de los parámetros del protocolo y las configuraciones requeridas para que el dispositivo pueda interactuar con el resto de la red. Estos perfiles son especificados por el *SIG*.

La arquitectura de Bluetooth se basa en un sistema maestro-esclavo, generando celdas llamadas *piconet* con un máximo de hasta 7 esclavos y un sólo dispositivo maestro. Se permite el traslape de esclavos entre celdas con lo cual se forma una *scatternet* como se muestra en la Figura 6, aunque no son muy utilizadas. [5]

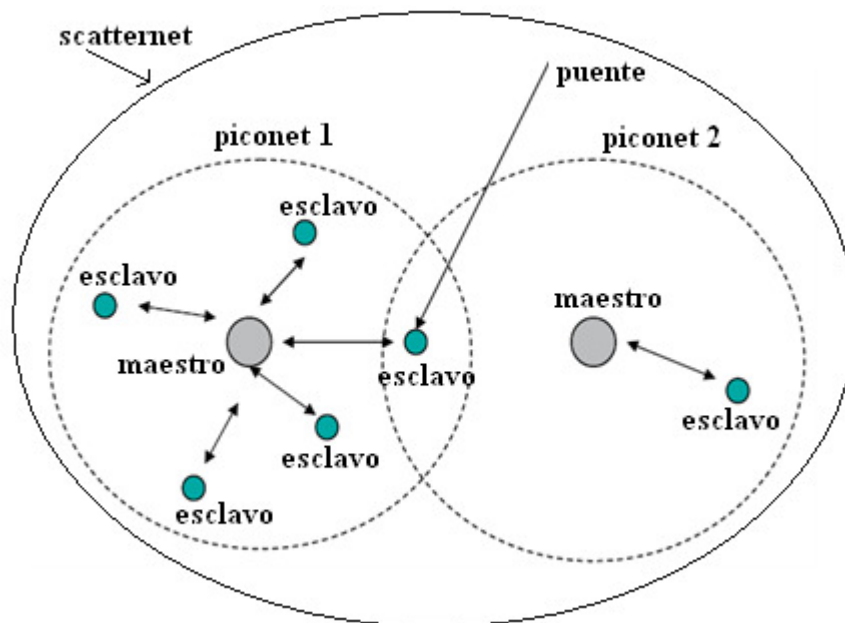


Figura 6. Arquitectura de Bluetooth, celdas traslapadas [5]

La máxima velocidad de transmisión de Bluetooth es de alrededor de 1Mbps para un rango de hasta 10 m en la versión 1.0, mientras que llega hasta 3 Mbps en la versión 2.0. Trabaja en la banda de 2.4 GHz y maneja hasta 79 canales. Utiliza un método de transmisión por salto de frecuencias (*frequency hopping*) con modulación GFSK (*Modulación por Desplazamiento de Frecuencia Gaussiana*), el cual consiste en aplicar una transformación gaussiana en primera instancia los datos a transmitir, para suavizar los bordes de la señal a transmitir, reduciendo con ello los armónicos y la interferencia en canales adyacentes, y a continuación aplicar una portadora que varía su frecuencia (salta) para cada dato a transmitir, obteniendo así una señal modulada multifrecuencia, la cual previene la pérdida total de la señal y una adecuada inmunidad a ruidos de fondo e interferencias, como se describe en la Figura 7. [5], [27]

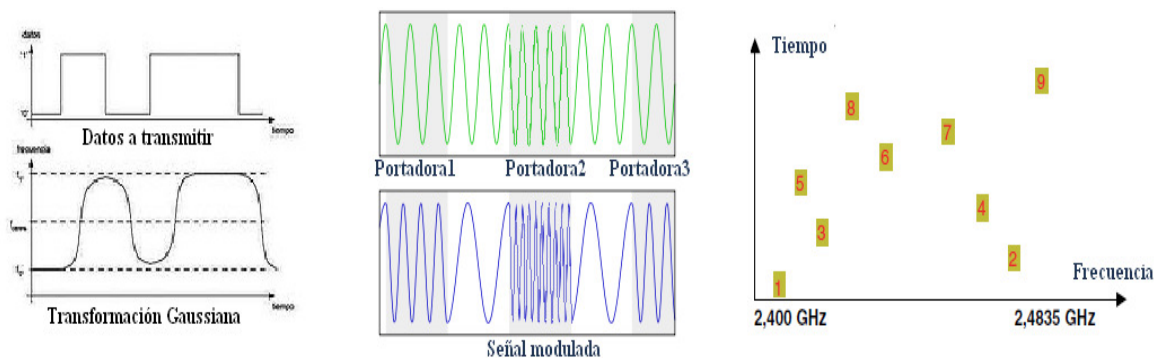


Figura 7. Técnica de modulación FHSS con modulación GFSK [5], [27]

ZigBee es un estándar inalámbrico abierto, basado en IEEE 802.15.4 y publicado por ZigBee Alliance. Opera en las bandas ISM sin licencia de 868 MHz (Europa), 915 MHz (Australia y USA), y 2.4 GHz (mayor parte del mundo). Transmite a tasas máximas de 20 kbps (868 MHz), 40 kbps (915 MHz) y 250 kbps (2.4 GHz). Maneja 16 canales y tiene un alcance típico de 10 a 75 m. Los dispositivos utilizan direcciones de 64 bits y direcciones cortas opcionales 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), lo cual ayuda a prevenir puntos de falla en las redes malla (*mesh*).

Implementa esquemas de seguridad durante la transmisión, e interactúa con muchos tipos de sensores. [4], [6]

Generalmente se requieren tres tipos de dispositivos en una red ZigBee: coordinador (*coordinator*), enrutador (*router*) y dispositivo terminal (*end device*). En la Figura 8 se muestra una red ZigBee típica. [3]

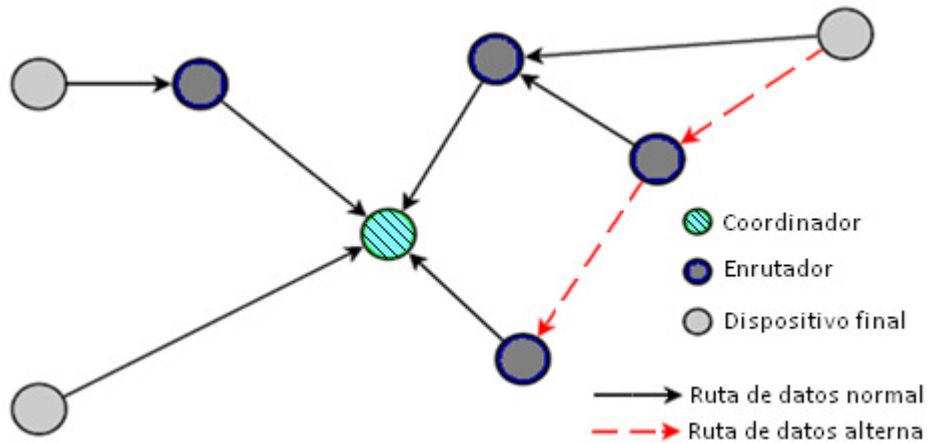


Figura 8. Arquitectura de ZigBee, red de malla (mesh) [3]

Una de las características más importantes de ZigBee es la posibilidad de formar redes dinámicamente a partir de los nodos existentes (*mesh networking*), lo cual extiende el alcance de la red y provee mayor fiabilidad de operación en casos de cambios en la configuración de la red. [3]

En la sección 2.2 se explicará más a detalle la arquitectura del estándar ZigBee. Como se puede observar, cada una de las tecnologías inalámbricas descritas anteriormente posee sus propias características, pero Zigbee sobrepasa a los demás en el ambiente doméstico, debido a su menor consumo de corriente tanto de operación como en espera (*standby*). Además la distancia visible es considerable (100m). Su principal desventaja es la menor tasa de transmisión, pero en el ambiente doméstico la cantidad de datos que se requiere transmitir es poca, y por lo general no se requiere actualizarlos en tiempo real, con lo cual esta desventaja no es relevante. [4]

2.2. Tecnología ZigBee y sistemas de medición de nivel de gas LP

Las principales áreas de estudio del presente trabajo son la tecnología ZigBee y los sistemas de medición de nivel de gas de tanques estacionarios domésticos, ya que son el fundamento para poder comprobar la hipótesis planteada.

2.2.1. Protocolo IEEE 802.15.4 y ZigBee

IEEE 802.15.4 es un estándar de comunicación inalámbrica diseñada para proveer aplicaciones con requerimientos moderados en cuanto a volumen de transmisión de datos y sin latencias críticas para operar en redes inalámbricas de área personal (*WPAN*). Entre las principales características de esta tecnología están su baja complejidad, bajo costo, bajo consumo de energía, bajas tasas de transmisión de datos, para operar en dispositivos fijos o móviles baratos, y orientándose a la construcción de redes de sensores inalámbricos (*WSN*). [7]

En la Figura 9 se comparan las características de diversos protocolos inalámbricos. Se puede apreciar que ZigBee se usa en aplicaciones con rango de alcance medio y bajas tasas de transmisión, típicas de las redes de sensores. [8]

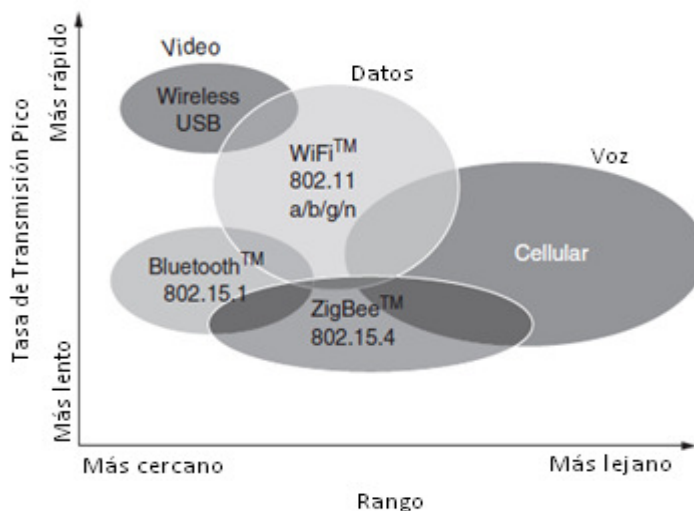


Figura 9. Comparación de ZigBee con otras tecnologías inalámbricas [8]

Los dispositivos de una red IEEE 802.15.4 se clasifican en dispositivos de funcionalidad completa (*FFDs*) y dispositivos de funcionalidad reducida (*RFDs*). Uno de los *FFDs* se designa como el coordinador de la red (*PAN coordinator*) y su función es mantener la red y manejar a otros dispositivos. Un *FFD* también puede desempeñar la función de ruteador (*router*) para retransmitir información hacia otro dispositivo de la red. Un *RFD* sólo puede recibir datos desde o enviar datos hacia un coordinador con el que esté asociado. Cada dispositivo tiene una dirección única completa de 64 bits. Después de asociarse a un coordinador, al dispositivo se le asignará una dirección corta de 16 bits. A partir de ese momento, todos los intercambios de datos utilizarán la dirección corta. [9]

2.2.2. Topologías de red en ZigBee

ZigBee soporta diversas topologías de red: estrella (*star*), punto a punto (*peer-to-peer*), agrupación (*cluster*), malla (*mesh*) y árbol (*tree*). Las topologías básicas (estrella y punto a punto) están definidas en el estándar IEEE 802.15.4, mientras que el resto están definidas en las especificaciones de ZigBee Alliance. La Figura 10 muestra dichas topologías. [5], [10]

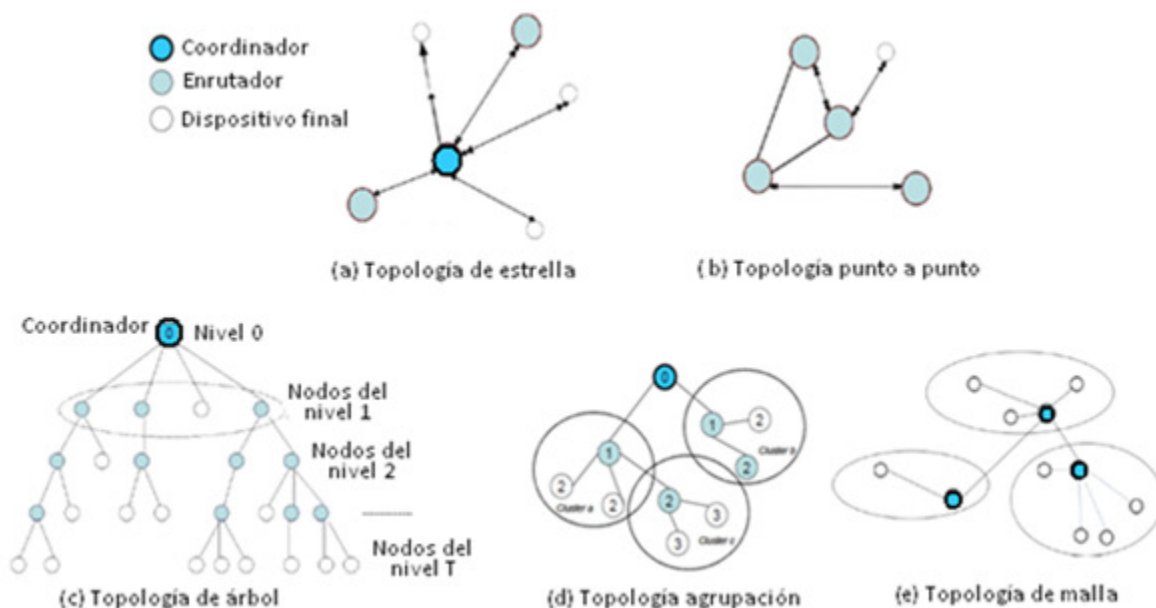


Figura 10. Topologías de red soportadas por el estándar ZigBee [5], [10]

La topología estrella (*star*) (Figura 10a), se prefiere cuando el área de cobertura es pequeña y la aplicación requiere poca latencia. La comunicación es controlada por el *PAN coordinator*, quien envía paquetes de datos para sincronizar y manejar la asociación de dispositivos a la red. Los *FFDs* sólo se comunican con su *PAN Coordinator*. [7]

La topología punto a punto (*peer-to-peer*) (Figura 10b), se prefiere cuando debe cubrirse una gran extensión y la latencia no es un asunto crítico. Las redes formadas pueden ser más complejas, y cualquier *FFD* puede comunicarse con otro *FFD* usando una técnica llamada *multi-hop* para intercambiar parámetros y reconocer las características que cada dispositivo soporta. Esto requiere memoria adicional en el dispositivo, para construir dinámicamente tablas de direccionamiento hacia otros dispositivos y generar enrutamientos dinámicos. [7]

La topología de árbol (*tree*) (Figura 10c), se caracteriza por un único coordinador, donde los nodos inferiores transmiten su información hacia el enrutador inmediatamente superior, hasta llegar al coordinador. Esta topología se inicia con el coordinador, el cual emite *beacons*, esperando que los nodos candidatos se unan. Si el coordinador lo acepta, entonces el dispositivo recién añadido comienza a su vez a emitir *beacons* para que otros dispositivos se le unan, sin que colisionen con los *beacons* de otros dispositivos. [7]

La topología agrupación (*cluster*) (Figura 10d), corresponde a un híbrido formado al aplicar una estructura de árbol a varias estrellas. Cada estrella es un grupo (*cluster*). Es esencialmente una red de árbol desbalanceada. Esta estructura puede ser usada por las capas más altas para controlar algunas funciones específicas como direccionamiento o agregación de datos. [10]

La topología de malla (*mesh*) (Figura 10e), incrementa el alcance y la confiabilidad de la red, buscando rutas alternas si las principales dejan de estar disponibles. Sin embargo, los dispositivos no pueden entrar a modo de consumo reducido, lo cual incrementa el consumo de energía de los dispositivos. [5], [9]

2.2.3. Stack del protocolo IEEE 802.15.4

El grupo de trabajo de IEEE 802.15.4 se enfocó en la estandarización de las dos capas más bajas del *modelo OSI*. Para definir las capas superiores existe la especificación ZigBee, como se muestra en la Figura 11. [9]

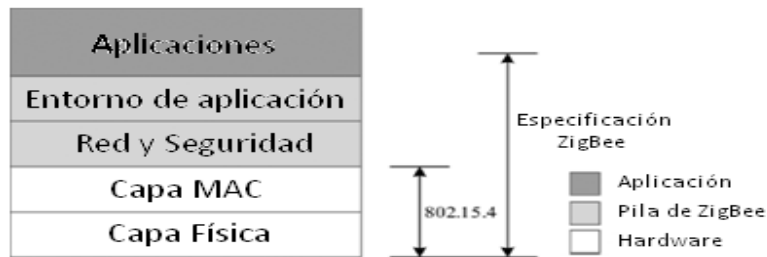


Figura 11. Pila de protocolos de ZigBee [9]

2.2.4. Capa física (PHY) en IEEE 802.15.4

La capa física (*physical layer, PHY*) del protocolo IEEE 802.15.4 opera en 3 diferentes bandas de radiofrecuencia sumando un total de 27 canales, como se muestra en la Figura 12. La banda de 868 MHz (Europa) permite transmitir a 20 kbps, con una sensibilidad de -92 dBm y alcance ideal de 1 Km. La banda de 915 MHz (Estados Unidos) tiene características similares, pero transmite a 40 kbps. La banda de 2.4 GHz (mundial) transmite a 250 kbps con una sensibilidad de -85 dBm y alcance ideal de 220 m. Estos rangos asumen que el dispositivo puede transmitir al menos a -3dBm (0.5 mW). [7], [9]

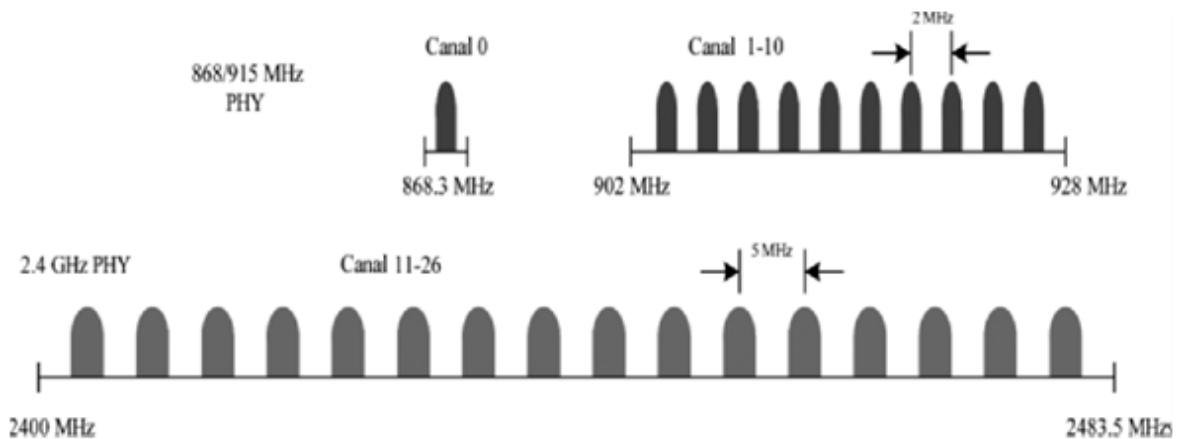


Figura 12. Arreglo de canales por banda en el protocolo IEEE 802.15.4 [9]

En las bandas de 868 y 915 MHz se usa el esquema de modulación *BPSK* (*binary phase shift keying*), en el que los datos son codificados y mapeados a trozos (*chips*) de 15 bits, para finalmente ser modulados. Por otro lado, en la banda de 2.4 GHz se usa el esquema de modulación *O-QPSK* (*offset quadrature phase shift keying*), en el que los datos son mapeados inicialmente en símbolos por grupos de 4 bits. Posteriormente los símbolos se mapean en trozos (*chips*) de 32 bits para finalmente ser modulados.

O-QPSK y BPSK minimizan el consumo de energía y reducen la complejidad de implementación y el costo. [5]

Los dispositivos están inactivos más del 99% del tiempo y la longitud útil (*payload*) de datos que se pueden transmitir en un paquete de capa física está limitada a 127 bytes. [7], [9]

El formato de los paquetes de capa física de IEEE 802.15.4 se muestra en la Figura 13. [5]

Octetos : 4	1	1		variable
Preámbulo	SFD Delimitador de Inicio de Trama	Longitud de la Trama (7 bits)	Reservado (1 bit)	PSDU Unidad de Servicios de Datos de la Capa Física

Figura 13. Formato de paquetes de capa física de IEEE 802.15.4 [5]

Cada paquete comienza con un campo de preámbulo de 4 bytes. En este campo se transmiten siempre ceros, y sirve para sincronizar el *transceiver* con una señal entrante. Después sigue el delimitador de inicio de trama (*SFD*) de un byte, que indica el fin de la sincronización, y está formado por una secuencia fija. Posteriormente está la longitud de la trama (7 bits). Luego un bit reservado y los datos a transmitir (máximo 127 bytes). [5]

2.2.5. Capa de enlace de datos (Data Link) en IEEE 802.15.4

La capa de enlace de datos (*data link layer*) se divide en 2 subcapas: control lógico del enlace (LLC) y control de acceso al medio (MAC). La subcapa LLC presenta una interfaz uniforme a la capa de red y sigue el estándar IEEE802.2 Esto se muestra en la Figura 14. [9],[5]

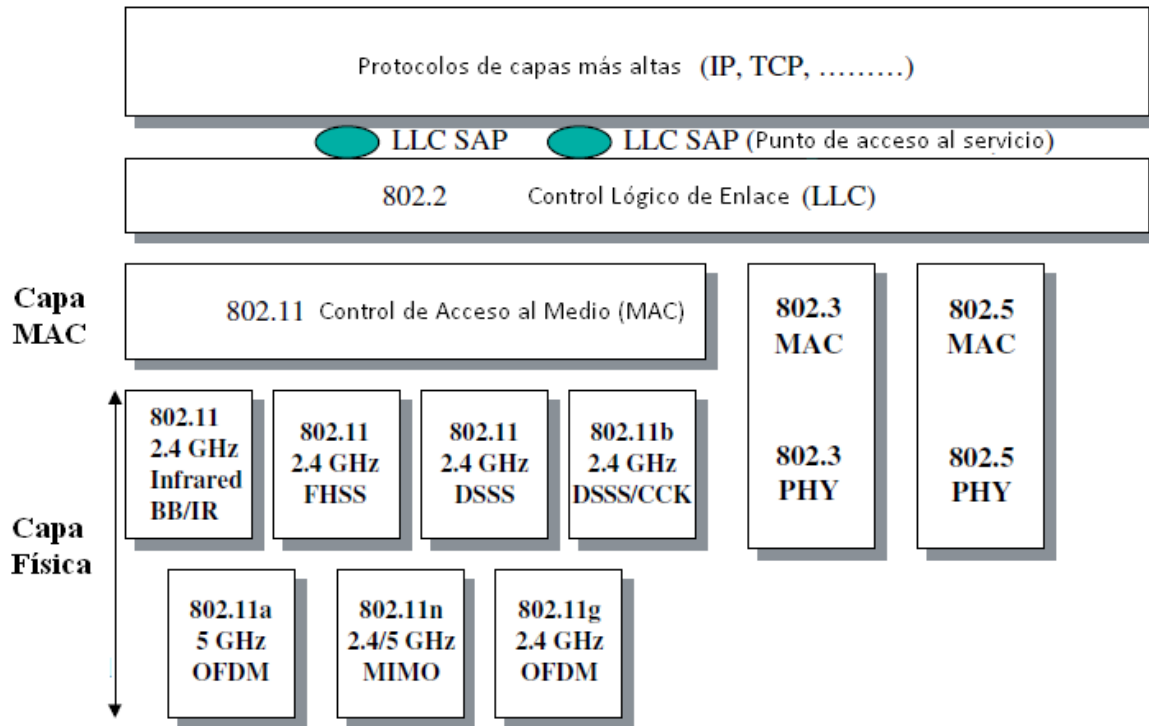


Figura 14. División de la capa de enlace de datos en IEEE 802 [5]

En el protocolo IEE802.15.4 se manejan paquetes de señales de aviso (*beacons*) enviados por el coordinador de la red para indicar el inicio de una transmisión. La Figura 15 muestra la estructura de los beacons en ZigBee. [5]

Octetos: 2	1	4/10	2	variable	variable	variable	2
Control de la trama	Número de secuencia	Campos de direccionamiento	Especificación de Superframe	Campos de ranuras de tiempo garantizadas	Campos de direcciones pendientes	Carga útil del beacon	Secuencia de chequeo de trama
Encabezado de MAC			Carga útil de MAC				Final de trama MAC

Figura 15. Estructura de los beacons en ZigBee. [5]

Al periodo entre un *beacon* y el siguiente se le conoce como supertrama (*superframe*). La subcapa MAC maneja las supertramas, controla el acceso a los canales, valida las tramas, envía reconocimientos, maneja las operaciones de bajo consumo y los mecanismos de seguridad. [9]

IEEE 802.15.4 define dos modos operacionales para acceder al canal: “beacon deshabilitado” y “beacon habilitado”.

El modo “beacon deshabilitado” usa un mecanismo *CSMA/CA* sin slots para acceder el canal y transmitir los paquetes de datos. Inicialmente cada nodo suspende toda actividad por un número aleatorio de unidades de tiempo (llamadas periodos de *backoff*). Luego verifica el canal por un periodo llamado espacio distribuido inter-tramas (DIFS), y si el canal está libre se inicia la transmisión. De lo contrario espera otro número aleatorio de unidades de tiempo, y vuelve a verificar si el canal está libre. Este ciclo se repite en caso de no poder efectuar la transmisión hasta alcanzar un límite, en cuyo caso la transmisión se cancela. Este proceso se ilustra en la Figura 16. [7], [5]

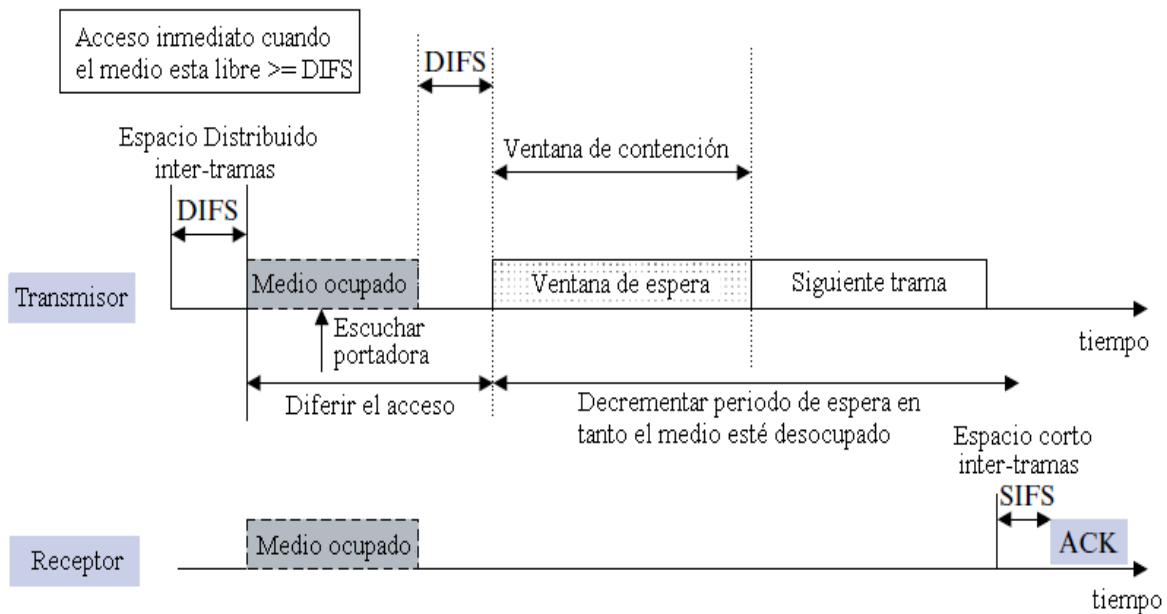


Figura 16. Mecanismo de acceso CSMA/CA [5]

En el modo “beacon habilitado” el acceso al canal se maneja a través de una supertrama, que inicia con un beacon transmitido por el coordinador de la red. El canal debe estar libre por dos periodos consecutivos de backoff (DIFS) antes de transmitir y los límites de los periodos de *backoff* de cada nodo se deberán alinear con los límites de las ranuras de tiempo de la supertrama. La supertrama puede contener una parte inactiva y una parte activa dividida en dos periodos: Periodo de Contención de Acceso (CAP) y Periodo Libre de Contención (CFP), compuestos por espacios de tiempo llamados Ranuras de Tiempo Garantizadas (GTS), que pueden ser asignados a nodos específicos. El coordinador de la red puede asignar hasta 7 GTS, pero una buena porción de la parte activa debe ser usada en el proceso de prevención de colisiones en el bus (contención). La estructura de una supertrama se muestra en la Figura 17. [7]

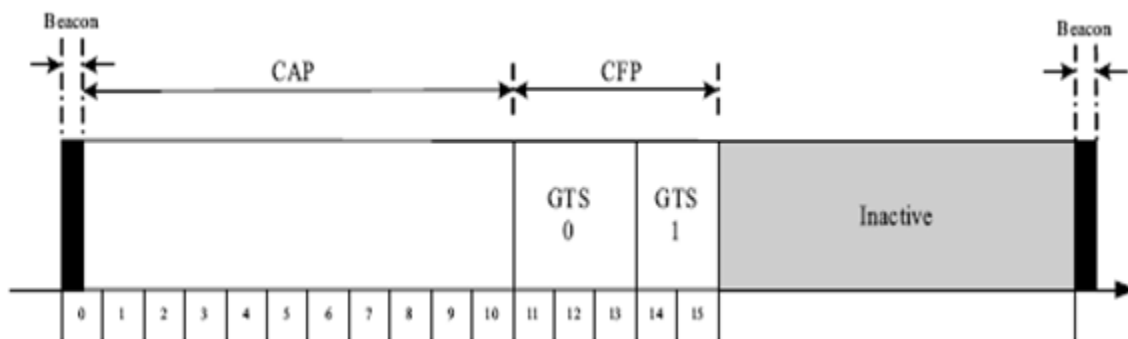


Figura 17. Estructura de una supertrama en IEEE 802.15.4 [9]

2.2.6. Programación de Beacons en una red IEEE 802.15.4

En IEEE 802.15.4 la estructura de las supertramas es controlada por el coordinador utilizando los parámetros orden del beacon (BO) y orden de la supertrama (SO), los cuales definen la longitud de una supertrama y su porción activa respectivamente. En el modo “beacon habilitado” SO se debería cumplir la relación $0 \leq SO \leq BO \leq 14$. [9]

Cuando $BO > SO$ los dispositivos pueden ir a dormir durante los periodos inactivos de las supertramas para ahorrar energía. En la especificación ZigBee 1.0, un superframe puede dividirse en $2^{(BO-SO)}$ ranuras de tiempo no superpuestas.

Un enrutador puede elegir una ranura de tiempo para enviar su beacon, el cual deberá estar separado de los beacons de su predecesor y de sus vecinos para evitar colisiones de beacons. Pueden ocurrir dos tipos de colisiones: conflicto directo entre nodos vecinos, y conflicto indirecto entre nodos no vecinos, como se muestra en la Figura 18. [9], [52]

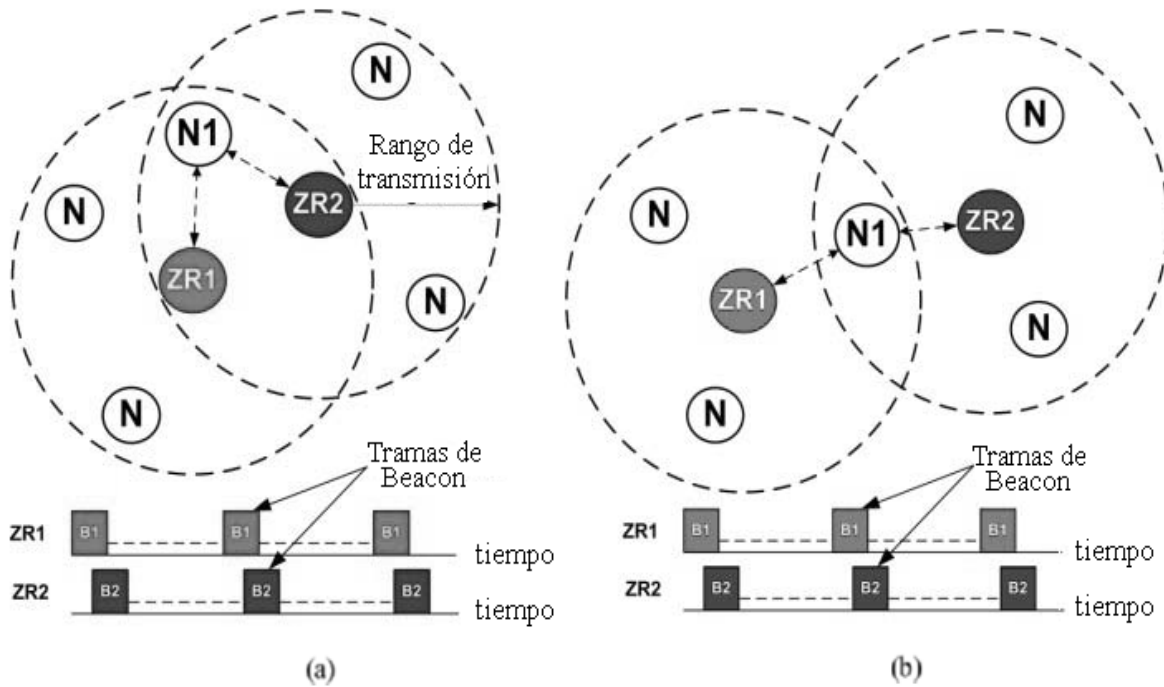


Figura 18. Colisiones de beacons: (a) Directo ; (b) Indirecto [52]

Aunque en la especificación de ZigBee no se ofrece una solución explícita a estos problemas, durante el proceso de asociación el enrutador escucha los beacons de su predecesor y de sus vecinos y elige una ranura de tiempo que no tenga conflicto con otros dispositivos. Si no hay ranuras de tiempo disponibles, el dispositivo se convertirá en un *end device*. Después de que el enrutador elige la ranura de tiempo a utilizar, la capa de red informa a la capa MAC la diferencia de tiempo entre la transmisión del beacon del enrutador y el del beacon de su predecesor. [9]

2.2.7. Proceso de asociación en IEEE 802.15.4

Un dispositivo se vuelve miembro de una red mediante el proceso de asociación con el coordinador mostrado en la Figura 19. El dispositivo hace un barrido primero a los canales para encontrar coordinadores potenciales y escucha sus beacons (si los tiene); luego transmite una solicitud de asociación hacia el coordinador. El coordinador contestará con una reconocimiento (ACK). Después de procesar la solicitud, el coordinador responderá colocando la dirección de red extendida del dispositivo en las tramas de los beacons, indicando que el resultado de la solicitud está disponible. Si el dispositivo confirma que su dirección está incluida en un beacon, enviará una solicitud al coordinador para recibir la decisión de asociación, y el coordinador la enviará al dispositivo. [9]

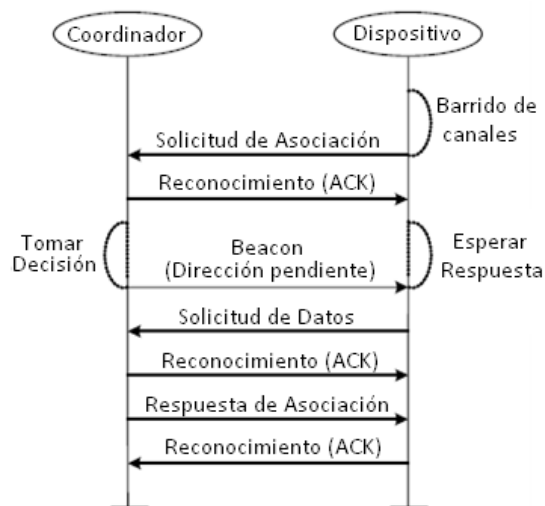


Figura 19. Proceso de asociación en IEEE 802.15.4 [9]

Un coordinador puede solicitar a un dispositivo asociado que deje la red, mediante el comando de desasociación. Al recibirlo el dispositivo confirmará con ACK. El coordinador considerará que el dispositivo ha sido desasociado de su red aún cuando no reciba correctamente la confirmación. De manera similar, cuando un dispositivo desea dejar la red, envía un comando de desasociación al coordinador, el cual responderá con un reconocimiento (ACK) y removerá los registros correspondientes al dispositivo. El dispositivo se considerará a si mismo desasociado aún si no recibe un reconocimiento (ACK) del coordinador. [9]

2.2.8. Asignación de direcciones en ZigBee

En una red ZigBee las direcciones de red son asignadas a los dispositivos mediante un esquema distribuido. Después de formar la red, el coordinador determina el máximo número de descendientes de un enrutador (C_m), el número máximo de enrutadores descendientes asociados a un enrutador (R_m), así como la *profundidad de la red* (L_m). Con estos parámetros se hacen (R_m+1) particiones lógicas, comenzando por los enrutadores descendientes del coordinador, y el último bloque lo ocupan los *end devices* asociados al coordinador. [9]

El coordinador está a profundidad 0 ($d=0$) y tiene dirección 0, y cada nivel hacia abajo es de una profundidad incremental ($d+1$). Para calcular la dirección de un dispositivo en la red se usan las ecuaciones (2.1) a (2.3). [53]

$$Cskip(d) = \begin{cases} 1 + C_m \times (L_m - d - 1) & \text{si } R_m = 1 \\ \frac{1 + C_m - R_m - C_m R_m^{L_m - d - 1}}{1 - R_m} & \text{de otro modo.} \end{cases} \quad (2.1)$$

$$A_{child_router}(n) = A_{parent} + (n - 1) \times Cskip(d) + 1 \quad (2.2)$$

$$A_{child_end_device}(n) = A_{parent} + R_m \times Cskip(d) + n \quad (2.3)$$

En la Figura 20 se muestra un ejemplo del cálculo de direcciones. El número máximo de hijos de cualquier nodo de la red de la Figura 20 es 5 ($C_m=5$), pertenecientes al coordinador. El número máximo de enrutadores hijos de algún enrutador es 4 ($R_m=4$), pertenecientes también al coordinador. Por último la profundidad de red es 2 ($L_m=2$), pues no hay algún dispositivo en un nivel inferior.

Aplicando las ecuaciones (2.1) a (2.3) se obtiene:

$$Cskip(0) = (1 + 5 - 4 - 5 \times 4^{(2-0-1)}) / (1-4) = (2 - 5 \times 4^{(1)}) / (-3) = (2 - 20) / -3 = -18 / -3 = 6$$

Para los enrutadores hijos del coordinador se obtienen las siguientes direcciones:

$$Addr_{childrouter}(1) = (0 + ((1 - 1) \times 6) + 1) = (0 + (0 \times 6) + 1) = 1$$

$$Addr_{childrouter}(2) = (0 + ((2 - 1) \times 6) + 1) = (0 + (1 \times 6) + 1) = 7$$

$$\text{Addr}_{\text{childrouter}(3)} = (0 + ((3 - 1) \times 6) + 1) = (0 + (2 \times 6) + 1) = 13$$

$$\text{Addr}_{\text{childrouter}(4)} = (0 + ((4 - 1) \times 6) + 1) = (0 + (3 \times 6) + 1) = 19$$

Mientras que la dirección del único *end device* del coordinador se calcula:

$$\text{Address}_{\text{end_device}(1)} = (0 + (4 \times 6) + 1) = 24 + 1 = 25$$

Posteriormente se calcula $C_{\text{skip}}(1)$ para poder obtener las direcciones de los dispositivos asociados a cada enrutador hijo del coordinador:

$$C_{\text{skip}}(1) = (1 + 5 - 4 - 5 \times 4^{(2-1-1)}) / (1-4) = (2 - 5 \times 4^{(0)}) / (-3) = (2 - 5) / -3 = -3 / -3 = 1$$

Finalmente se calculan las direcciones de cada dispositivo hijo de los enrutadores, aplicando las ecuaciones (2.2) y (2.3)

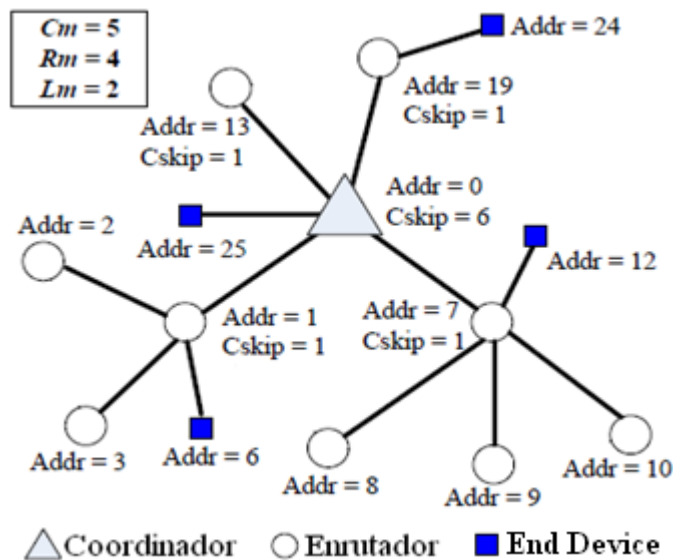


Figura 20. Cálculo de direcciones en una red ZigBee [53]

2.2.9. Enrutamiento en una red ZigBee

En una red en árbol (tree), el coordinador y los enrutadores transmiten paquetes de datos a través del árbol. Cada dispositivo checa inicialmente si el paquete recibido tiene como destino a él mismo, en cuyo caso acepta el paquete. Si el destino es uno de sus descendientes, lo reenvía exclusivamente al descendiente designado. Si el destino no es alguno de los anteriores, se reenviará el paquete a otros enrutadores dentro de la red. [9]

Si el nodo destino recibe múltiples solicitudes de ruta de distintos nodos, elegirá la solicitud con menor costo de trayectoria y le enviará una respuesta exclusiva a través de los nodos intermedios que formen dicha trayectoria. A partir de ese momento el nodo origen envía paquetes de datos al nodo destino a través de la trayectoria descubierta. [9]

La capa de red de ZigBee especifica mecanismos de mantenimiento de rutas en redes de malla (*mesh*) y en redes de árbol (*tree*). En redes de malla existen contadores de falla de enrutamiento en cada enrutador, los cuales al exceder el límite de fallas definido comienzan el procedimiento de mantenimiento, durante el cual envían solicitudes de ruta enviando paquetes a los predecesores o descendientes de la dirección destino. En una red de árbol, si un enrutador pierde a su predecesor se desasocia de él y busca asociarse a otro, y si lo logra recibe una nueva dirección de red y desconectará a sus nodos sucesores, los cuales buscarán a su vez asociarse a nuevos predecesores. [9]

Si un enrutador no puede enviar paquetes a alguno de sus nodos sucesores, descartará el paquete y enviará una respuesta de error de ruta al originador del paquete. Asimismo, el enrutador enviará un comando de desasociación al nodo sucesor, el cual buscará asociarse al mismo o a un diferente predecesor. [9]

2.2.10. Transmisión broadcast en una red ZigBee

En una red ZigBee el iniciador del *broadcast* especifica su alcance. El dispositivo que recibe un paquete verificará si el radio de transmisión es mayor que cero, en cuyo caso se retransmitirá el paquete. De otro modo el paquete no se retransmite más. Después de reenviar el paquete, se guarda la información del paquete enviado en la tabla de transacciones de retransmisión (BTT). Esta tabla se combina con la de los nodos vecinos para saber si un mensaje fue recibido y retransmitido a su vez por ellos. En caso de no haber sido reenviado se retransmitirá a través de toda la red. [9]

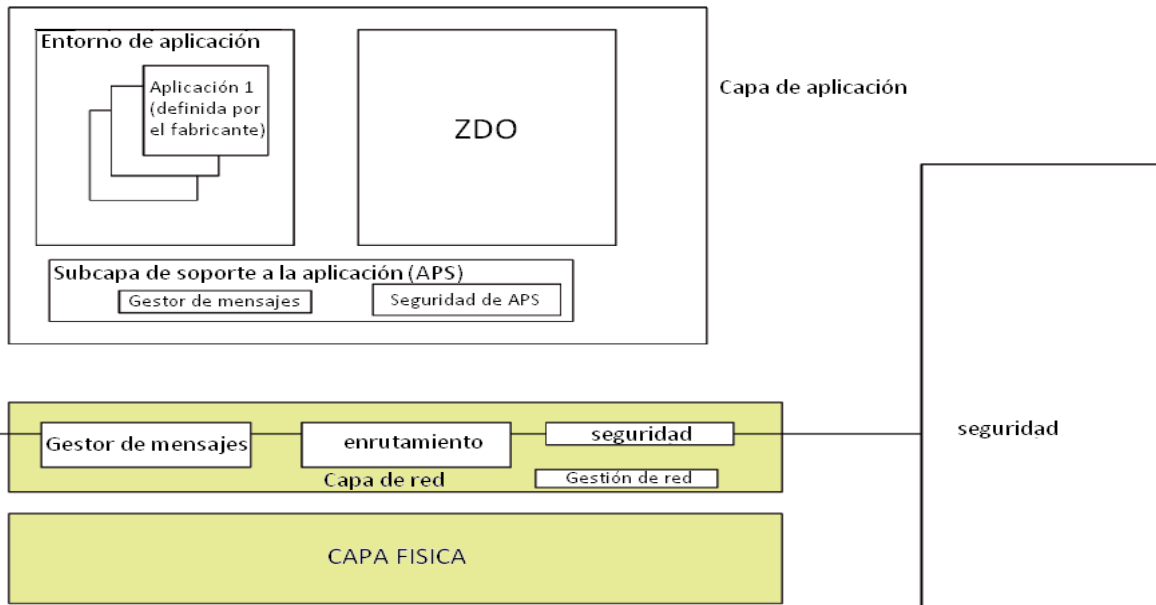


Figura 23. Pila de protocolos de ZigBee [5]

ZigBee utiliza perfiles (*profiles*) para definir las aplicaciones que se ejecutan en la capa superior del dispositivo. ZigBee especifica, además, los miembros y posibles acciones, constituyendo así los requerimientos del dispositivo que desempeña un determinado rol. Mediante los identificadores de los perfiles se posibilita la localización de servicios disponibles en los dispositivos pertenecientes a la red. [5]

Los servicios de seguridad en el ZDO tienen el rol de autenticar y producir las claves necesarias para el cifrado de datos, complementando el esquema de seguridad utilizado por IEEE 802.15.4. [5]

El controlador de red es otro componente del ZDO, implementado en el coordinador. Sus funciones principales son la interconexión con PANs existentes, la creación de nuevas PANs y la implementación de algoritmos de enrutamiento entre los enrutadores de diferentes PANs que han sido descubiertas. [5]

El último componente es el controlador de integración (*binding manager*), mediante el cual se ligan nodos a recursos y aplicaciones, y dispositivos a canales. [5]

2.2.12. Seguridad en redes ZigBee

ZigBee usa un esquema simétrico de cifrado basado en el algoritmo *AES 128-bit* para proporcionar confidencialidad durante la transmisión de datos. Adicionalmente ZigBee implementa un “contador de frescura” (*freshness counter*) para prevenir ataques de repetición y verificación de integridad de mensajes para prevenir su modificación. ZigBee no proporciona mecanismos para la verificación de firmas digitales, pero mediante el uso de cifrado de clave pública se pueden implementar esquemas de autenticación. [11]

En el esquema de seguridad de ZigBee se utilizan tres tipos de claves: clave maestra, clave de conexión y clave de red. Una clave maestra es una clave de seguridad de largo plazo entre dos dispositivos, la cual puede registrarse manualmente, estar pre-instalada o ser enviada inalámbricamente. Se usa para envíos en la red y generación de claves de cifrado de conexión. Una clave de conexión provee seguridad en el intercambio de información entre dos dispositivos. Una clave de red provee la seguridad en la red. Las claves de conexión y de red pueden ser pre-instaladas o registradas con apoyo de las claves maestras de red, y pueden ser actualizadas periódicamente. [11]

El centro de confianza ZigBee administra los miembros de la red y la distribución de las claves de cifrado. Opera en dos modos: residencial y comercial.

El modo residencial sólo usa una clave de encriptación de red K_N , la cual es utilizada por todos los dispositivos de la red. Este esquema requiere pocos recursos del centro de confianza, pero no previene ataques internos.

El modo comercial ofrece mucha mayor seguridad y se emplea en aplicaciones críticas, pero requiere generar más claves y consume un ancho de banda mucho mayor. Utiliza una clave de red compartida K_N . Cada par de nodos de la red implementa un par de claves particulares a utilizar en los mensajes entre dichos nodos (clave maestra y clave de cifrado del enlace). Por ejemplo, para los

nodos A y B se implementan K_{MAB} (clave maestra) y K_{LAB} (clave de cifrado del enlace), y así sucesivamente para cada par de nodos existente en la red. [11]

En la Figura 24 se muestra el número de claves en ambos modos: residencial y comercial. El nodo A es el coordinador de red y centro de confianza de red. Los nodos B, C y D son enrutadores, mientras que los nodos E, F, G, H son *end devices*. [11]

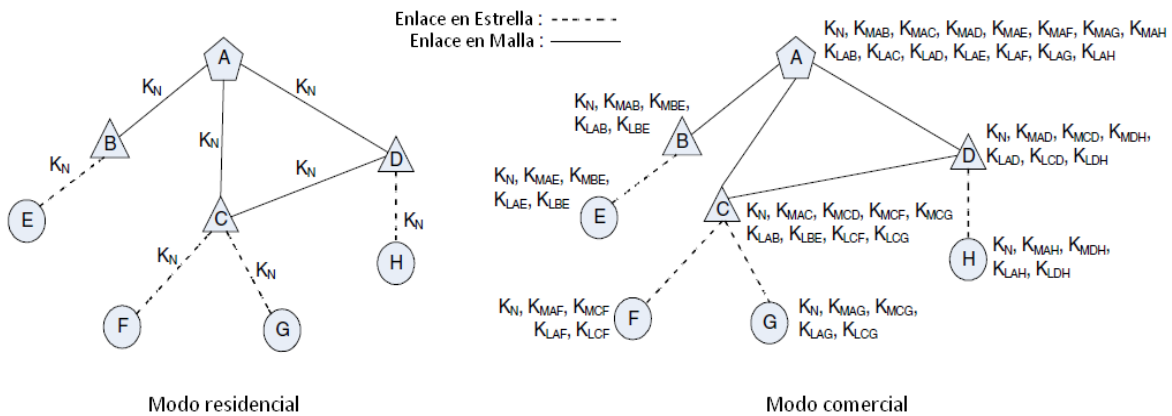


Figura 24. Claves de cifrado ZigBee en modos residencial y comercial [11]

2.3. Fundamentos de los tanques estacionarios de gas LP

Los tanques estacionarios domésticos de gas LP (Licuado de Petróleo) son recipientes de acero diseñados especialmente para contener gas LP a alta presión. En México los tanques estacionarios almacenan una mezcla de gas propano y butano (C_4H_{10}) surtida mediante pipas o autotanques. Esta mezcla de gas LP es distinta al gas natural (metano CH_4), el cual es más ligero y se distribuye por medio de tuberías subterráneas.

El gas LP se encuentra en forma líquida en la parte inferior del tanque estacionario y en estado de vapor en la parte superior, como se observa en la Figura 25. [12]

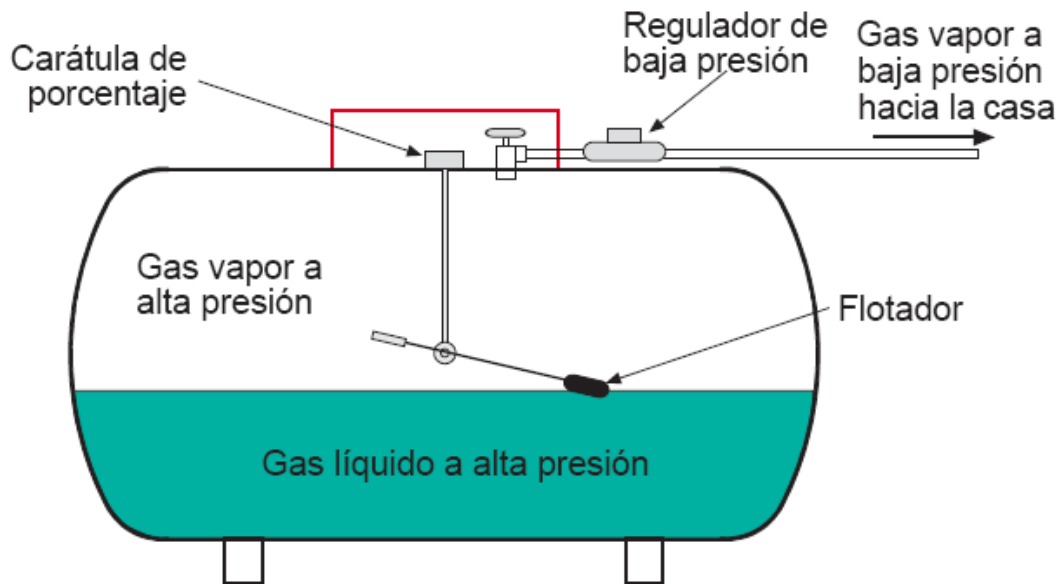


Figura 25. Almacenamiento del gas LP en un tanque estacionario doméstico [12]

Todos los tanques estacionarios cuentan con un flotador que descansa sobre la superficie del gas líquido. La varilla del flotador puede variar en tamaño, pues depende del diámetro del tanque estacionario, ya que los engranes deben situarse exactamente en la parte media del tanque estacionario. Los engranes cambian la dirección del movimiento del flotador y lo transmiten a través de una varilla de aluminio hacia la parte superior del tanque en donde se encuentra un imán que es posicionado por el giro de la varilla, y se localiza exactamente por debajo de la base de la carátula de porcentaje. [12]

La carátula de porcentaje se atornilla en el exterior del tanque estacionario, sobre la base de la carátula. La cantidad de gas líquido al interior del tanque se indica mediante una aguja metálica que se posiciona por efecto del imán situado al interior del tanque. En la Figura 26 se muestra el mecanismo del flotador de un tanque de gas LP estacionario. [12]

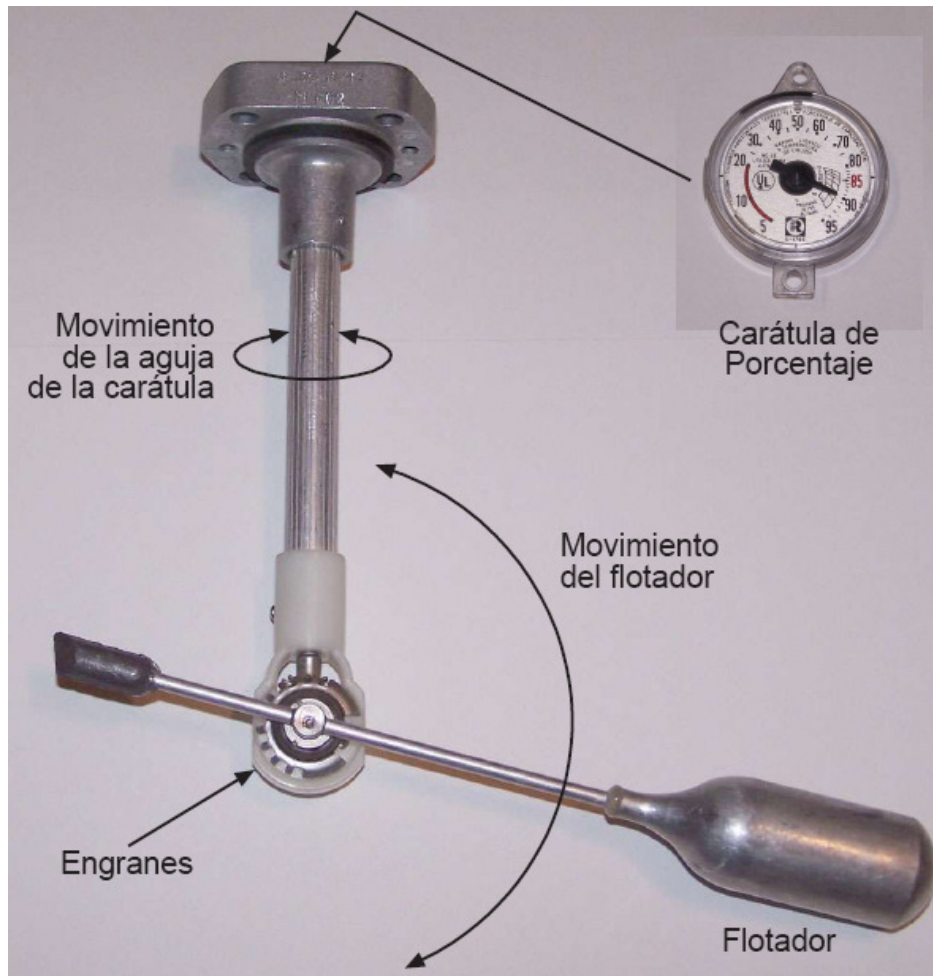


Figura 26. Mecanismo del flotador de un tanque de gas LP estacionario [12]

2.4. Sensores de efecto Hall

La mayoría de los sistemas comercialmente disponibles para el monitoreo del nivel de tanques de gas estacionario utilizan una carátula con un sensor de efecto Hall para obtener la lectura del nivel del tanque de gas estacionario. Una vez obtenida la lectura es convertida a un voltaje de referencia que puede ser procesado y transmitido hacia el dispositivo que lo despliega, ya sea de manera alámbrica o inalámbrica.

El efecto Hall es una tecnología de estado sólido que no emplea contactos móviles y es más confiable que los sistemas que usan contactos deslizables y resistores variables. Se fundamenta en el hecho de que un imán desvía el flujo de electrones que se mueve a través de un semiconductor. Esta desviación puede detectarse y convertirse a un voltaje radiométrico de salida proporcional al nivel del gas líquido al interior del tanque. [13]

El voltaje radiométrico de salida puede utilizarse para ser amplificado, para convertirlo a frecuencia, a una señal de PWM, o puede ser digitalizado y enviado como un patrón de pulsos digitales, lo cual facilita el uso de sistemas basados en microcontroladores que utilizan *transceivers* de diversos protocolos para la transmisión de datos y su posterior procesamiento y despliegue.

2.5. Sistemas comerciales para monitoreo de nivel de tanques de gas LP

Se efectuó una investigación sobre los sistemas comercialmente disponibles a nivel mundial para la medición del nivel de tanques de gas estacionarios domésticos.

A continuación se describen los diversos productos analizados, la compañía que los fabrica, sus principales características y la tecnología que utilizan para su funcionamiento.

- Tyron (Gaslow). Compañía inglesa dedicada a la fabricación de sistemas de medición de presión en llantas para automóvil, y sistemas de medición de gas propano en tanques.

<http://www.gaslow.co.uk/>

El producto desarrollado por esta compañía es el indicador electrónico remoto de combustible propano *Gaslow 1500*, mostrado en la Figura 27. [22]



Figura 27. Gaslow 1500 [22]

Este producto se conecta directamente al medidor por cable (5 mt máximo), e indica fugas al conectar un tanque por primera vez (detector de gas en el ambiente), así como indica que hay bajo nivel de gas en el tanque por medio de un led que flashea. Su interface se limita a este led parpadeante, y no es interconectable con otros dispositivos o sistemas de monitoreo. No transmite la información sobre el nivel de gas en el tanque. [22]

- Maverick Industries. Compañía estadounidense dedicada a la fabricación de sistemas de conexión y medición para sistemas en base a tanques de gas LP.

<http://www.maverickhousewares.com>

El producto desarrollado por esta compañía es el indicador electrónico remoto de nivel de propano *Gas Watch II GW-212E*, mostrado en la Figura 28. [23]



Figura 28. Gas Watch II GW-212E [23]

Este producto se conecta directamente al medidor por cable (1 mt máximo), tiene integradas las funcionalidades de detector de fugas y de limitador de flujo de emergencia. Se alimenta con una batería de 9V y tiene una barra de leds de colores que indica el nivel de gas en el tanque y una alarma audible cuando hay bajo nivel en el tanque. No es interconectable con otros dispositivos o sistemas de monitoreo. No transmite la información sobre el nivel de gas en el tanque. [23]

- Rochester. Compañía estadounidense líder en sistemas de almacenamiento y medición de gas. Tiene más de 70 años de experiencia en sistemas de gas LP.

<http://www.rochestergauges.com/Pages/Products.html>

Entre los múltiples productos desarrollados por esta compañía está el indicador *TwinSite TS012*, el cual se usa para medir y transmitir el nivel de gas de un tanque estacionario doméstico, mostrado en la Figura 29. [13]



Figura 29. Rochester TwinSite TS012 [13]

Este indicador incorpora la funcionalidad de un medidor de tradicional de aguja con un sensor de efecto Hall, el cual permite que a partir de un voltaje de referencia se obtenga un voltaje de salida directamente proporcional al nivel del tanque de gas. Típicamente el voltaje de referencia a utilizar en este indicador es desde 3.5V hasta 6V, y puede proporcionar lecturas que varían entre el 8% y el 80% del nivel del tanque de gas estacionario. Este sensor se usa ampliamente como base de diversos sistemas que realizan monitoreo remoto. Por el hecho de

tener componentes que no tienen fricción y por estar sellados, pueden resistir la intemperie y no generar chispas, lo cual lo hace ideal para operar en ambientes explosivos, como el área que rodea a los tanques de gas. [13]

Esta misma compañía produce en México, a través de su filial Medidores Internacionales Rochester SA de CV, el indicador Elga 3340-00001 mostrado en la Figura 30, el cual reporta de manera alámbrica el nivel de gas para un tanque estacionario doméstico horizontal, utilizando el indicador Rochester *Twinsite* mencionado anteriormente. [24]



Figura 30. Rochester Elga 3340-0001 [24]

Este sistema despliega en un par de displays de 7 segmentos el nivel del tanque de gas expresado en porcentaje. Su voltaje de alimentación es de 9V. El sistema consume un máximo de 100 mA, y actualiza el nivel desplegado cada minuto. El sistema puede indicar niveles bajos mediante el flasheo intermitente de los números mostrados en los displays de 7 segmentos. El cable utilizado para conectar al sensor de efecto Hall con el módulo principal no debe medir más de 100 mts. Este sistema no se conecta con otros sistemas domóticos. [24]

- RobertShaw Industrial Products (Centeron). Compañía estadounidense dedicada a la fabricación de controles de nivel, termostatos, monitores de vibración, válvulas y medidores de nivel inalámbricos.

<http://wirelessmonitoring.centeron.net/index.html>

Entre sus productos más destacados en el monitoreo inalámbrico de nivel de tanques de propano están:

- Monitor de nivel inalámbrico *RSI-33521*. Reporta el nivel del tanque de gas propano industrial, usa un indicador con sensor de efecto Hall, y transmite la información obtenida mediante celular, teléfono satelital, Ethernet o teléfono fijo. Se muestra en la Figura 31. [25]



Figura 31. Centeron RSI-33521 [25]

La batería incluida dura hasta 10 años transmitiendo una vez al día. Este producto puede configurarse remotamente, emite alarmas predefinidas, monitorea si se rellena el tanque o si se roba combustible, genera reportes mensuales, indica el status de la batería y del nivel de la señal de radio y opcionalmente puede incluir un GPS. [25]

- Monitor de nivel inalámbrico *RSI-12333*. Este producto monitorea el nivel de un tanque de gas propano industrial, utilizando un indicador con sensor de efecto Hall, y transmitiendo la información obtenida mediante un protocolo que usa la técnica de codificación de señales DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum). Se muestra en la Figura 32. [26]



Figura 32. Centeron RSI-12333 [26]

La batería incluida dura hasta 5 años transmitiendo cada 4 horas. Tiene indicador de batería baja. Su alcance es de hasta 1.6 Km de distancia en campo abierto. [26]

- Monitor de nivel inalámbrico *RS-228*. Este producto monitorea el nivel de un tanque de gas LP doméstico, utilizando un indicador con sensor de efecto Hall y transmitiendo la información obtenida mediante un protocolo propietario que opera en la banda ISM de 433 MHz. Se muestra en la Figura 33. [28]

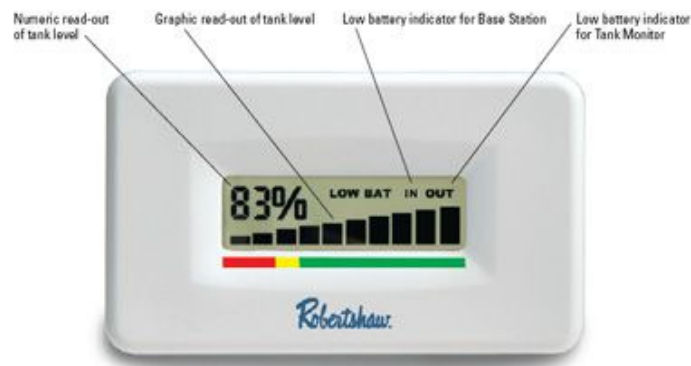


Figura 33. RobertShaw RS-228 [28]

Se alimenta con dos baterías AA en el transmisor y dos en el receptor. Las baterías tiene una duración de dos años transmitiendo cada 4 minutos a una potencia de 1mW. Su alcance es de 50 mts. Despliega el nivel de gas tanto numéricamente como en barras en un display LCD, así como indica si hay baja batería. El usuario debe indicar la posición (horizontal o vertical) del tanque mediante un switch en el transmisor. [28]

Aunque el diseño del indicador es bastante atractivo, de acuerdo a los reportes de los usuarios sobre el desempeño de este producto [29], se tienen diversos problemas para sincronizar al transmisor con el receptor, así como para mantener el enlace una vez establecido. Asimismo se reporta que en climas fríos extremos su funcionamiento es muy inestable, necesitando reiniciar frecuentemente el dispositivo.

- MideGas. Compañía mexicana fabricante de medidores de nivel de gas en tanques estacionarios y otros accesorios diversos.

<http://gas-lp.com/index.html>

Uno de sus principales productos (mostrado en la Figura 34) es el indicador *MideGas P*, el cual transmite por cable el nivel de gas de un tanque estacionario doméstico. [12]

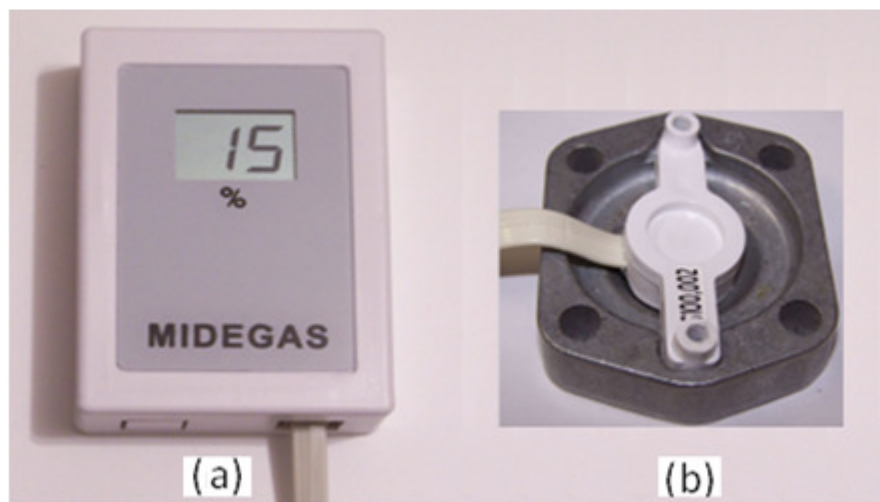


Figura 34. MideGasP : (a) Indicador ; (b) Sensor de nivel de gas [12]

Este medidor utiliza el sensor de efecto Hall mostrado en la Figura 34(b), que mide el nivel de gas en el tanque efectuando lecturas cada 60 segundos, y transmitiéndolas por cable hasta el módulo indicador con el display LCD mostrado en la Figura 34(a). Despliega asimismo un aviso cuando la batería es baja. Se alimenta con una batería de 9V, la cual tiene una duración de alrededor de dos años, dependiendo de la frecuencia con que se realicen las mediciones. [12]

Aunque el sensor no tiene indicador por sí mismo para poder visualizar el nivel del tanque, se puede colocar la carátula original encima del sensor de nivel, con lo cual se puede conservar la visibilidad en el tanque del nivel real de gas. Es posible recalibrar el equipo en caso de que muestre diferencias importantes entre la carátula del tanque y las lecturas reportadas por el sistema. Sin embargo es un proceso manual y complejo, muy poco recomendable, y se requiere sacar el flotador del tanque para poder realizar el ajuste. [12]

- Grupo CGV México. Compañía mexicana establecida en Querétaro en 2003. Fabrica sistemas de medición para tanques de gas estacionarios, y distribuye accesorios para la instalación de sistemas de gas domésticos e industriales.

<http://www.cgvmexico.com/index.php>

Ofrece el indicador *CuentaGas* para monitoreo remoto de nivel de tanques estacionarios, basados en el sensor de efecto Hall Rochester *Twinsite*. En la Figura 35 se muestra dicho indicador en versiones (a) analógica y (b) digital. [30], [54]

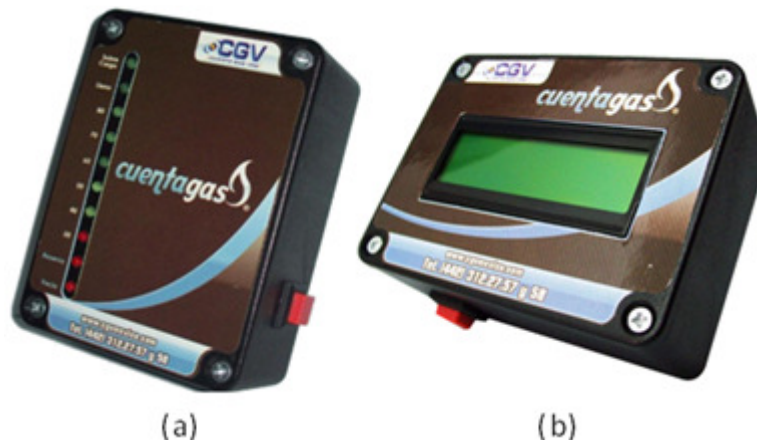


Figura 35. CuentaGas : (a) Analógico ; (b) Digital [30],[54]

Ambos indicadores reciben mediante cable el nivel de gas existente en el tanque estacionario, solamente varía la manera de desplegar la información, mediante leds en el medidor analógico, o mediante un display LCD en el caso del medidor digital. Ambos indicadores remotos funcionan con una batería de 9V. No indican el nivel de la batería, y no comparten la información del nivel del tanque de gas con algún otro sistema que se pudiera interconectar. El usuario no tiene la opción de recalibrar el equipo. Al oprimir el botón de encendido se muestra el nivel del tanque de gas por algunos segundos, y el sistema vuelve a apagarse. [30], [54]

2.6. Resumen de lo que se conoce y se desconoce del área de estudio

Se conoce la funcionalidad del protocolo ZigBee, así como el manejo de microcontroladores y módulos de radiofrecuencia. Sin embargo lo que no se conoce por completo es el rendimiento de los sistemas de transmisión inalámbricos ZigBee cuando la información a ser transmitida debe atravesar techos y paredes, para llegar a distancias considerables al interior de una casa habitación, así como la manera de validar que el sistema satisfaga las necesidades de fiabilidad de la información y de funcionalidad requeridos por la aplicación de monitoreo del nivel de gas de un tanque estacionario doméstico.

2.7. La contribución que este estudio hará a la literatura citada

Lo que se busca aportar con esta investigación es caracterizar el rendimiento de los transmisores inalámbricos ZigBee cuando se utilizan en un escenario doméstico y que involucra elementos ambientales que pueden afectar la fiabilidad de la información y el consumo de energía del sistema. Asimismo, se busca comparar el rendimiento de sistemas alámbricos e inalámbricos de medición del nivel de tanques de gas estacionarios domésticos. Se buscará además generar un artículo para un congreso científico con las conclusiones de este trabajo.

III. METODOLOGÍA

3.1. Metodología de Investigación

En la sección 3.2.1 se modelarán los casos de uso del monitoreo de nivel de gas doméstico, de lo cual se podrán derivar los requisitos a cumplir. Se analizarán también los esquemas de seguridad que requiere el sistema para la protección de la información transmitida.

A partir de lo anterior, en la sección 3.2.2 se desarrollará una propuesta de diseño para el monitor de nivel y su correspondiente receptor.

En la sección 3.2.3 se describirá la implementación del sistema.

En las secciones 3.3 y 3.4 se definirá la instrumentación necesaria y el protocolo de pruebas que se aplicará en el estudio piloto, para poder comprobar la hipótesis objeto de este trabajo.

En la sección 3.5 Se desarrollará un protocolo de pruebas basado en las técnicas de Diseño de Experimentos.

Finalmente en el capítulo 4 se aplicará el protocolo de pruebas, y se analizarán los datos, comparándolos con sistemas comercialmente disponibles, a partir de los cuales se documentarán las conclusiones en el capítulo 5.

3.2. Procedimientos específicos

En esta sección se describirán los pasos efectuados durante el desarrollo de la investigación.

3.2.1. Consideraciones para el diseño del sistema propuesto

Para el desarrollo de la propuesta del sistema de monitoreo del nivel de gas LP del tanque estacionario se deben tomar diversas consideraciones que el sistema deberá cubrir.

- Un tanque estacionario doméstico de gas LP típico tiene una capacidad de 300 lts.
- El ambiente que rodea al tanque es potencialmente explosivo debido a la volatilidad del gas LP. Por ello los sistemas colocados en o cerca del tanque deberán ser sellados y no generar chispas eléctricas durante su funcionamiento.
- Un tanque estacionario generalmente se ubica en lugares ventilados, típicamente al aire libre en el techo de una casa, expuesto directamente a la acción del clima.
- Debido a que el tanque puede estar colocado en lugares de difícil acceso, el sistema debe ser altamente confiable y no requerir mantenimiento frecuente. Asimismo, en caso de ser alimentado de manera autónoma, las baterías que alimenten al sistema deben durar varios años
- La razón de consumo de gas en un ambiente doméstico es baja, pues se utiliza principalmente para alimentar calentadores de agua y estufas, por lo cual un tanque estacionario típico tardará varios meses antes de requerir ser recargado.
- El nivel transmitido por el sistema no requiere ser actualizado a intervalos cortos, ni se requiere de alta precisión en las lecturas del nivel del tanque.

- Debido a que la distancia entre el tanque y el sistema que despliega las lecturas recibidas puede ser considerable, se deberán tomar en cuenta posibles pérdidas de señal e interferencia, dependiendo del canal físico elegido para la transmisión.
- En los casos aplicables, la información transmitida deberá incorporar esquemas de seguridad para prevenir lecturas no autorizadas.

3.2.2. Propuesta de diseño del sistema de monitoreo

Con base en las consideraciones expuestas en la sección 3.2.1, se proponen las siguientes características para el sistema de monitoreo:

- El sistema constará de dos partes, una parte para generar las lecturas de nivel y transmitir las, y una parte para recibir y desplegar las lecturas del nivel de gas LP.
- El sistema utilizará una carátula con sensor de efecto Hall y salida de voltaje radiométrico, por su fiabilidad y simplicidad de uso.
- El sistema convertirá el voltaje radiométrico del sensor de efecto Hall a señales digitales, mediante un convertidor ADC de 8 bits, el cual proporciona una resolución de alrededor de 0.4% por cada muestra.
- El sistema utilizará un microcontrolador de 8 bits para procesar los datos provenientes del ADC. El microcontrolador programará la toma de lecturas y controlará el procesamiento digital y la posterior transmisión inalámbrica de los datos.

- La pila de protocolos a utilizar para la transmisión inalámbrica de datos entre el subsistema transmisor y el subsistema receptor será ZigBee, debido a que está orientado a la transmisión de señales provenientes de una red de sensores, cubriendo las necesidades de alcance del sistema, tasa de transmisión requerida, robustez ante interferencias y seguridad de la información; todo ello aunado a un bajo consumo de energía.
- El subsistema receptor desplegará la información recibida del sensor de nivel del gas LP del tanque estacionario mediante un display LCD.
- El sistema deberá estar en modo inactivo la mayor parte del tiempo, despertando a intervalos regulares para tomar lecturas y generar los mensajes apropiados dependiendo de la variación en la lectura, con el fin de ahorrar energía.
- La arquitectura del sistema facilitará la integración de otros nodos, con el fin de construir una red de sensores que posibilite un sistema de monitoreo más completo y cubrir diversos aspectos de las necesidades domésticas.

En la Figura 36 se muestra un diagrama a bloques del sistema de monitoreo propuesto.

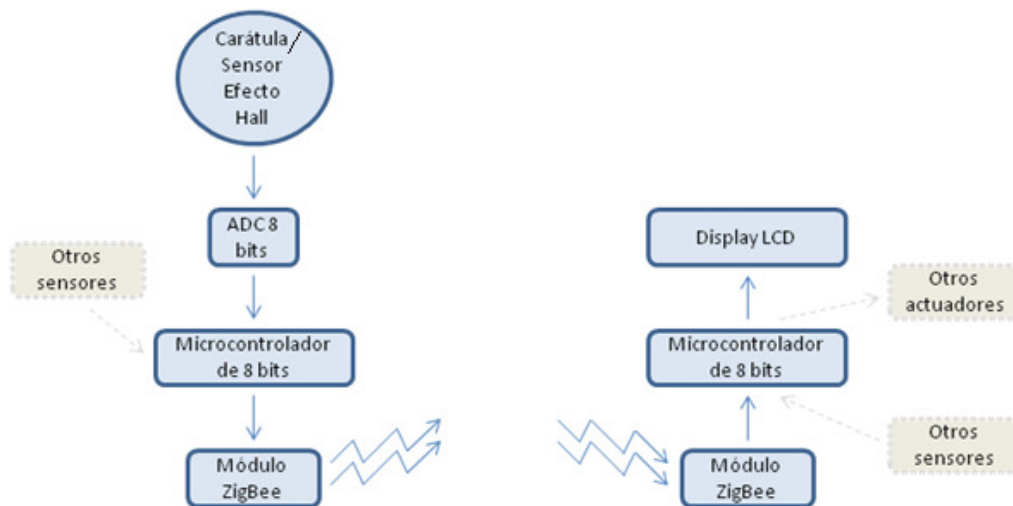


Figura 36. Diagrama a bloques del sistema de monitoreo propuesto

Para la elección de los componentes específicos utilizados en el diseño del sistema propuesto se consideró el manejar un esquema de funcionalidades distribuidas, incorporando componentes que fueran comercialmente disponibles, que pudieran ser montados en un circuito impreso sin requerir maquinaria especial, y que pudieran ser programados o configurados de manera simple.

- Al buscar sistemas de monitoreo comercialmente disponibles, se obtuvo una carátula Rochester DS-1318 con sensor de Efecto Hall. Este sensor se alimenta típicamente con 5 VDC, lo cual garantiza el mayor rango de medición y la máxima precisión. [14]
- El sensor de efecto Hall en la carátula no debe ser alimentado de manera continua, pues se produciría una variación del voltaje de salida debido a la compensación de temperatura que se realiza al interior del sensor. Sólo se deberá energizar por unos cuantos milisegundos para que el voltaje de salida radiométrico sea generado y leído, y luego el sensor debe ser desenergizado. [14]
- Para energizar al sensor de efecto Hall se probaron distintos diseños, como alimentación directa del pin del microcontrolador ó transistores. Sin embargo, el esquema empleado usa un relevador SunHold MD-5 (cuyas dimensiones y consumo de corriente para la bobina son muy reducidos) directamente conectado a un pin del microcontrolador para suministrar 5 VDC al sensor de efecto Hall. El uso del relevador permitió acoplar adecuadamente la salida del sensor de efecto Hall y obtener siempre lecturas correctas. [15]
- El microcontrolador de 8 bits elegido para el circuito transmisor de este diseño fue el COP8SAA720N9 de National Semiconductors, que cuenta con 1 KB de memoria OTP, 64 bytes de memoria RAM y 16 pines de entrada y salida. Utiliza una frecuencia de reloj de 10 MHz. Se alimenta de 5 VDC, no

requiere componentes externos para operar, y su Arquitectura Harvard modificada, amplio set de instrucciones, modos de ahorro de energía, baja interferencia electromagnética (EMI), robustez y simplicidad de uso lo hacen ideal para un diseño en espacios reducidos. Para el circuito receptor se eligió el microcontrolador COP8SGR728N8 de National Semiconductors, el cual usa una frecuencia de reloj de 15 MHz y cuenta con 32 KB de memoria OTP, 512 bytes de memoria RAM y 24 pines de entrada y salida, suficientes para implementar un centro de monitoreo y control y despliegue de información que pueda opcionalmente incorporar señales provenientes de otros sensores. El diagrama a bloques y la distribución de pines (pinout) de los microcontroladores utilizados se muestran en las Figuras 37 y 38. [16], [17]

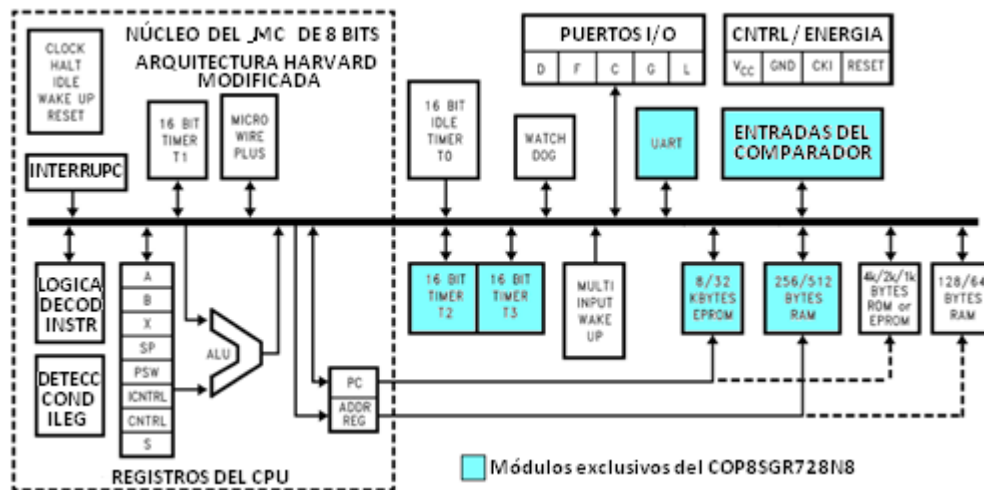


Figura 37. Arquitectura de los microcontroladores COP8SAx/SGRx [16], [17]

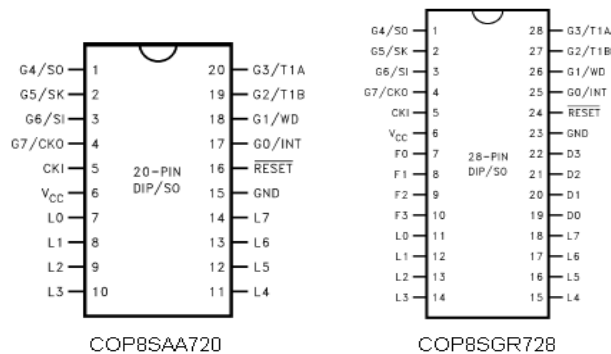


Figura 38. Pinout de los microcontroladores COP8SAA720, COP8SGR728 [16], [17]

- Con el fin de minimizar la cantidad de pines requeridos del microcontrolador, se utilizó el convertidor análogo-digital ADC0831C de 8 bits de National Semiconductors con Interface Serial Microwire. Se alimenta con 5V y ocupa muy poco espacio, pues sólo tiene 8 pines y no utiliza componentes externos adicionales. [18]
- Además, se utilizó un display LCD Digitron SC162A3 con de 2 líneas de 16 caracteres (2x16), retroiluminación (backlight), compatible con la interface de comandos HD44780. Se alimenta con 5V. Para descentralizar las tareas del sistema y minimizar la cantidad de pines utilizados del microcontrolador del centro de monitoreo y control, se utilizó un microcontrolador COP8SAA720N9 dedicado para el display LCD.
- El diseño del circuito impreso incluye, de modo opcional, el uso de una memoria EEPROM serial 93C46 para almacenar lecturas del nivel de gas. El código implementado en este trabajo no utiliza esta memoria EEPROM.
- En los Apéndices B y C se presentan algunos transceivers y módulos ZigBee comercialmente disponibles. Para la etapa de transmisión y recepción ZigBee se seleccionaron dos módulos Digi XBEE-Pro XBP24-BWIT-004 con antena de alambre, que funcionan en la banda de 2.4 GHz y transmiten a 250kbps con una potencia de 63mW. Operan a 3.3V, por lo que se tuvieron que acoplar las señales de entrada y salida para conectarse al microcontrolador a 5V, como se muestra en la Figura 39. [19]

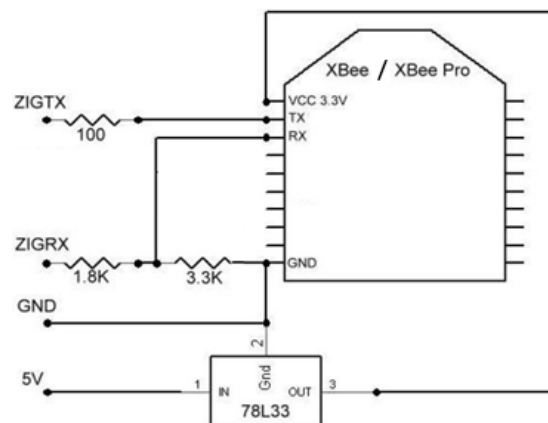


Figura 39. Acoplamiento de señales 3.3V – 5V para módulos XBEE [19]

- Los módulos XBEE son muy pequeños y simples de conectar y utilizar. No requieren componentes externos y se comunican por *UART (Universal Asynchronous Receiver and Transmitter)* con el microcontrolador. Se eligió una velocidad de transmisión de 9600 bauds, ya que la cantidad de datos a transmitir hacia el módulo XBEE es muy pequeña; además de que permite al microcontrolador procesar adecuadamente los tiempos de las señales de los mensajes del UART. [19]
- Los módulos Digi XBEE deben configurarse para operar en una red ZigBee. Esta configuración se puede realizar enviando Comandos AT directamente al módulo a través del pin DIN, pero la manera más simple es utilizar un adaptador USB, como el Sparkfun XBEE USB Explorer mostrado en la Figura 40.

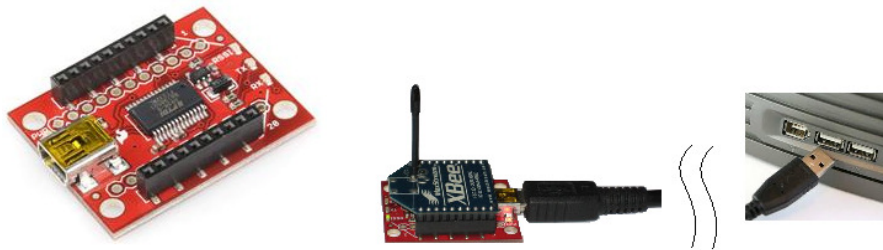


Figura 40. Sparkfun XBEE USB Explorer

- Con la aplicación X-CTU provista por Digi se configuran los parámetros de comunicación del módulo XBEE, así como se define si operará en modo transparente o en modo API (*Application Program Interface*).

En modo transparente el módulo XBEE se configura mediante comandos AT y los datos recibidos por el UART se transmiten directamente por radio frecuencia (*RF*), mientras que los datos recibidos por RF se envían por el UART hacia un controlador externo. [19]

En el modo API el módulo XBEE es configurado y controlado mediante comandos enviados por el UART, a través de los cuales se tiene acceso completo a las capacidades de red ZigBee de los módulos XBEE. [19]

La configuración de parámetros del módulo XBEE se ilustra en la Figura 41.

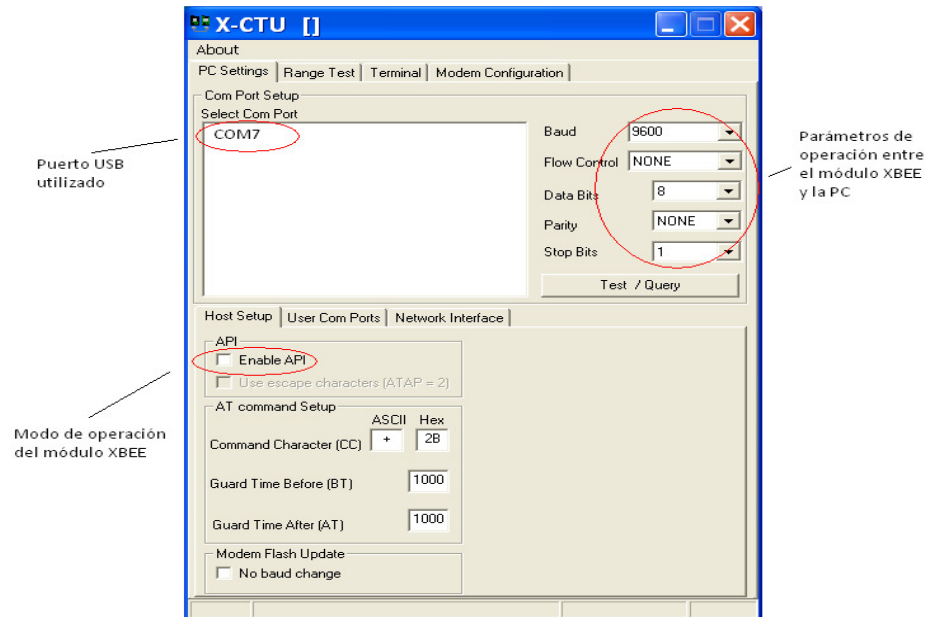
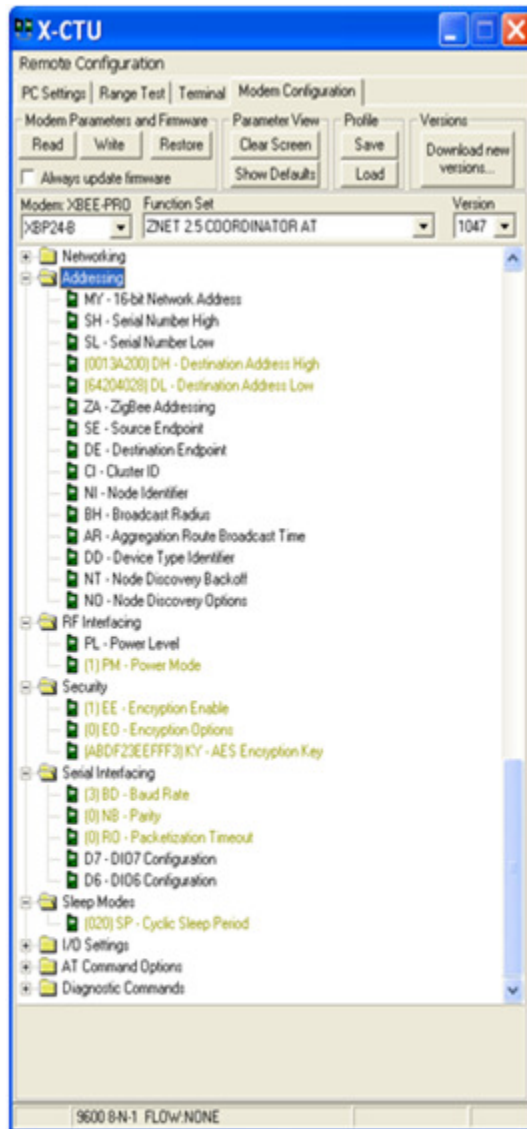
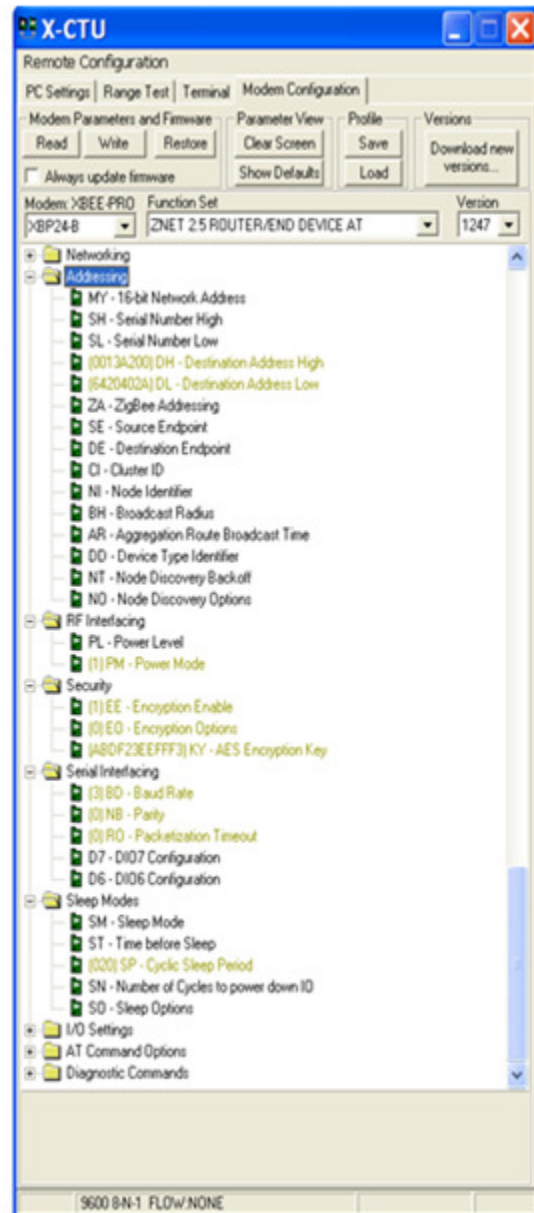


Figura 41. Aplicación Digi X-CTU para configurar los módulos Digi XBEE

- Para el sistema propuesto de monitoreo del nivel de gas LP se eligió el modo transparente, debido a que la operación de red del sistema es bastante simple y no interactúa con nodos de red adicionales. En el caso de requerir una interacción de red más compleja por la existencia de más nodos, entonces se propondría utilizar el modo API y ajustar la arquitectura del sistema para ese tipo de manejo de datos.
- Los módulos XBEE se configuraron para operar el UART a 9600 bauds, con 8 bits y sin paridad. Se programó uno de los módulos como coordinador, y el otro como *End Device*. Se especificó que los datos se transmitieran conforme fueran llegando (*packetization timeout=0*). Se especificaron los números de serie de los módulos con los cuales se deseaba realizar la comunicación (dirección destino de 64 bits), así como el modo de energía (*power mode*) deseado (se eligió el modo “boost mode enabled” para incrementar el alcance de transmisión), el tiempo durante el cual el *End Device* permanecería en modo de reposo (*sleep*) para ahorrar energía, y las opciones de cifrado de datos, incluyendo el establecer una clave de red. Esta configuración se observa en la Figura 42 para ambos módulos.



(a)



(b)

Figura 42. Configuración de parámetros de operación de módulos Digi XBEE :
 (a) Coordinador (b) Enrutador/End Device

- Con el fin de mantener la sincronía y velocidad del sistema que se requiere para interactuar con el ADC0831C, así como para procesar los mensajes del UART a 9600 bauds, se utilizaron cristales de 12MHz en los microcontroladores del transmisor y del receptor, con sus correspondientes capacitores de estabilización de 10 pF.

- Se debe considerar que un ciclo de instrucción en los microcontroladores COP8 se genera internamente a partir de 10 ciclos de reloj, por lo cual para un cristal de 12 MHz el ciclo de instrucción será de $(1/12E6) \times 10 = 0.83 \mu s$.
- Se utilizaron baterías de 9V para alimentar al sistema, por lo que se incluyeron reguladores de 5V (KIA78L05) y de 3.3V (L78L33) para generar los voltajes requeridos por el sistema.
- Se consideró que la antena de los módulos XBEE-Pro usados en el sistema propuesto fuese del tipo *whip* (látigo), pues tiene un mayor alcance que los módulos equipados con antena de *chip*. El Cuadro 2 muestra los alcances de dichos tipos de antenas en diferentes escenarios. [20]

Cuadro 2. Comparación de alcances de antenas en módulos XBEE [20]

Módulo	Tipo de Antena	Distancia en Exteriores (Línea de Vista)	Distancia en Interiores (Edificio de Oficinas)	Distancia en Interiores (Bodega)
XBee	Chip	(143 m)	(24 m)	-
	Whip	(258 m)	(24 m)	(26 m)
XBee-PRO	Chip	(515 m)	(43 m)	-
	Whip	(1335 m)	(43 m)	(108 m)

- Se debe considerar que el mayor alcance de los módulos XBEE-Pro conlleva un mayor consumo de energía para transmitir la información, lo cual se muestra en la comparación de consumo del Cuadro 3. [19]

Cuadro 3. Comparación del consumo de energía en módulos XBEE [19]

Especificación	XBee ZNet 2.5	XBee PRO ZNet 2.5
Requerimientos de Energía		
Voltaje de alimentación	2.1-3.6 V	3.0-3.4 V
Corriente de operación (Transmisión, máxima potencia de salida)	40mA (@ 3.3 V, modo de refuerzo habilitado) 35mA (@ 3.3 V, modo de refuerzo deshabilitado)	295mA (@3.3 V)
Corriente de operación (Recepción)	40mA (@ 3.3 V, 38mA (@ 3.3 V,	45 mA (@3.3 V)
Corriente en reposo (Receptor apagado)	15mA	15mA
Corriente en modo apagado	<1 uA @ 25°C	<1 uA @ 25°C

- Debido a que el patrón de radiación de las antenas tipo whip es isotrópico (tiene forma toroidal), su rendimiento es relativamente indistinto a su orientación en el plano perpendicular a la antena. Por tanto se espera un rendimiento uniforme durante la operación del sistema propuesto. La Figura 43 muestra el patrón de radiación de la antena tipo whip del módulo XBEE-Pro utilizado. [20]

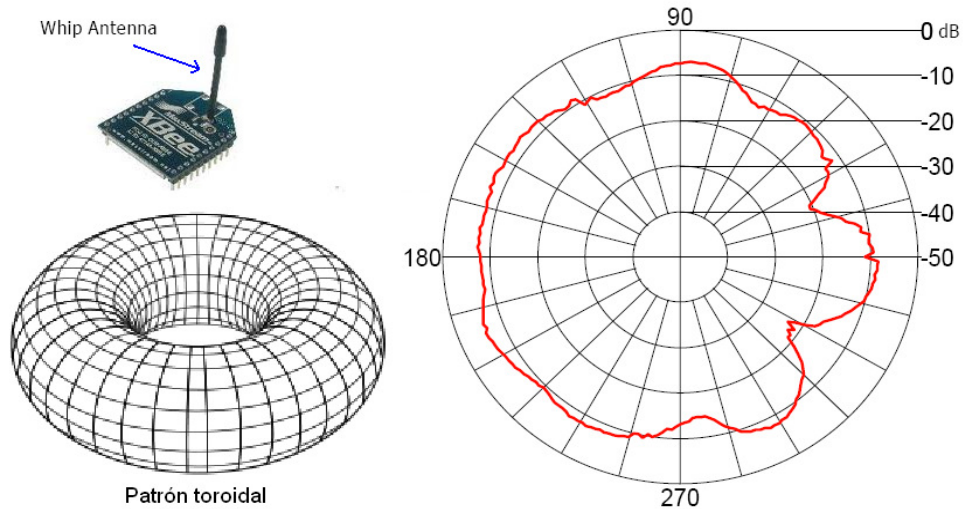


Figura 43. Patrón de radiación de antena tipo whip del módulo XBEE-Pro. [20]

En la Figura 44 se muestra el patrón de radiación de la antena tipo chip de un módulo XBEE, en el cual se observan áreas de poca ó nula cobertura, requiriendo orientar el módulo para obtener un mejor rendimiento. [20]

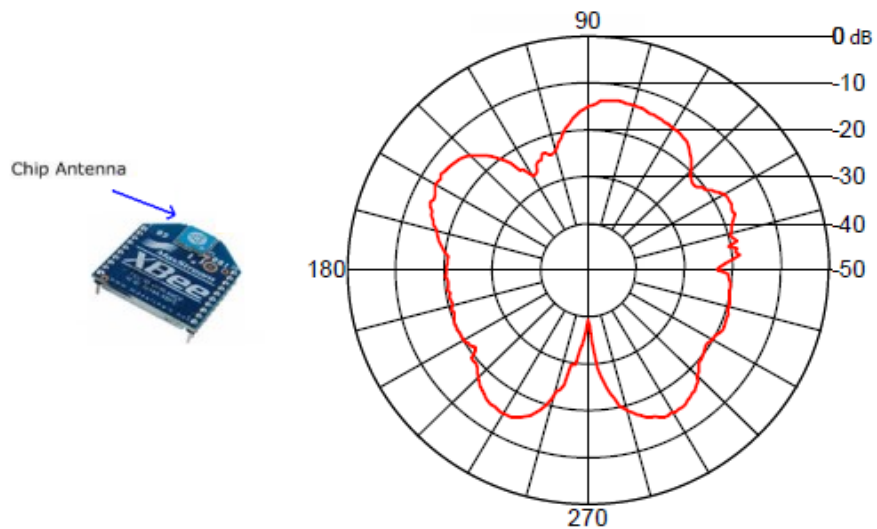


Figura 44. Patrón de radiación de antena tipo chip del módulo XBEE. [20]

3.2.3. Implementación del transmisor del sistema

A partir de todas las consideraciones anteriores, y utilizando los componentes listados en párrafos anteriores, se efectuó la implementación del sistema de medición propuesto. El transmisor se diseñó conforme al diagrama funcional de bloques de la Figura 45.

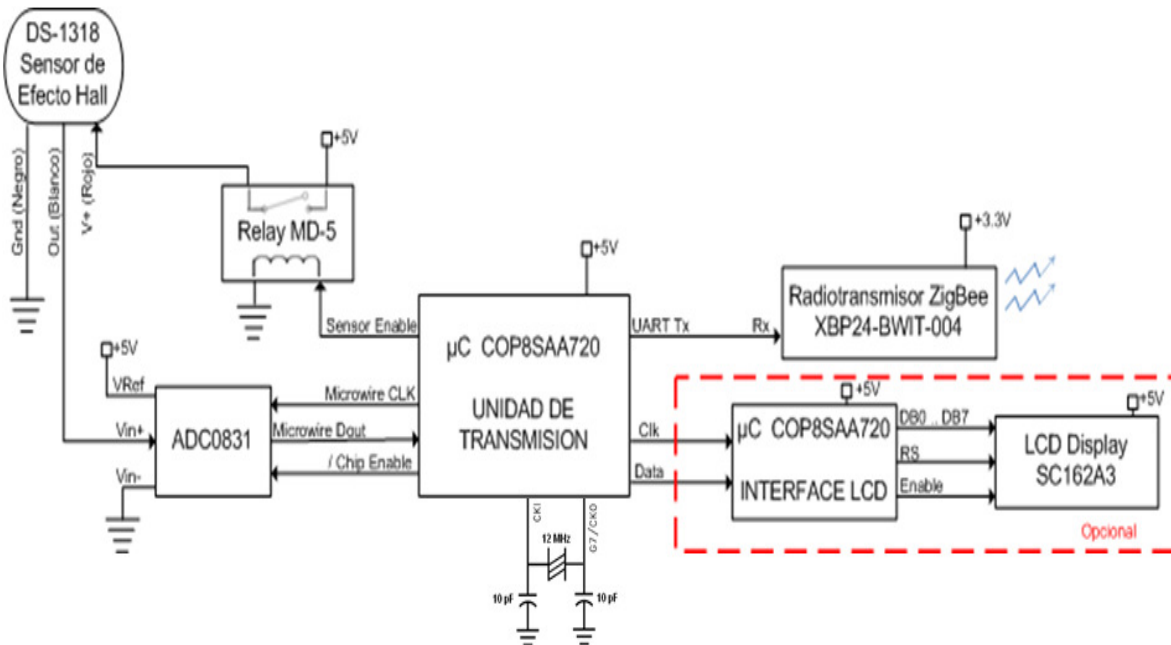


Figura 45. Diagrama funcional del transmisor del medidor de nivel de gas LP

El software de los microcontroladores COP8 del sistema de monitoreo propuesto se implementó directamente en lenguaje ensamblador, pues el conjunto de instrucciones del COP8 es bastante completo y simple de utilizar.

Las tareas básicas realizadas por el circuito de captura y transmisión de datos del sistema propuesto se muestran en el diagrama a bloques y el código fuente de la Figura 46.

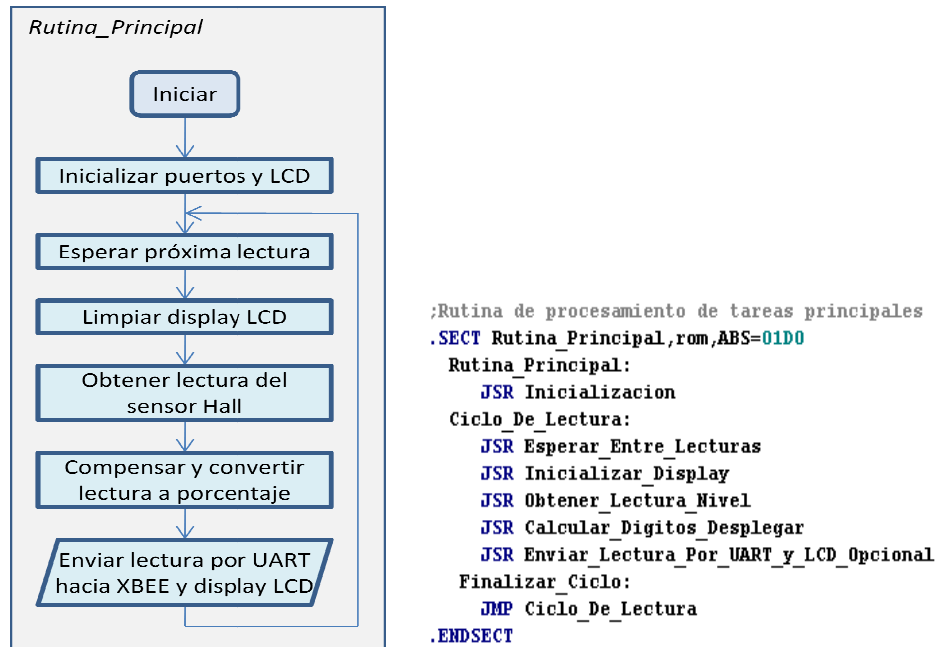


Figura 46. Tareas básicas del software del transmisor

En la rutina de inicialización del transmisor, mostrada en la Figura 47, se definen los pines de los puertos G y L del microcontrolador COP8 como entradas o salidas, y se configura el registro CNTRL para la adecuada operación de la funcionalidad Microwire. Se coloca la dirección del registro PSW en el apuntador B para ser utilizada en posteriores instrucciones, ahorrando así tiempo de procesamiento y espacio de memoria de programa.

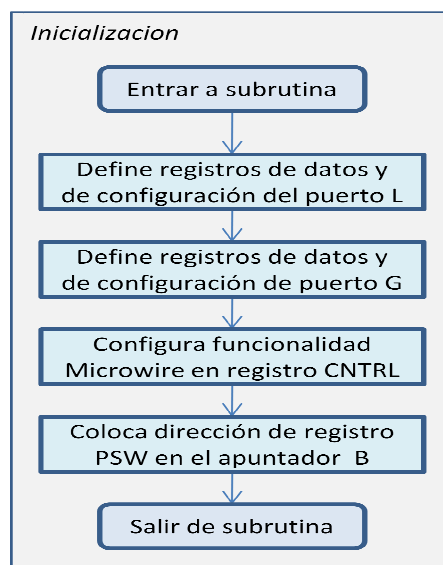


Figura 47. Diagrama de inicialización del transmisor

En la Figura 48 se muestra la rutina para generar el tiempo de espera entre lecturas. Este tiempo se fijó a 560 ms para generar mediciones continuas y ejecutar el protocolo de pruebas propuesto, pero en el modo de operación normal deberá ajustarse a un tiempo de espera de varias horas, para reducir el consumo de energía y debido a que el sistema no requiere contar con lecturas actualizadas muy frecuentemente.

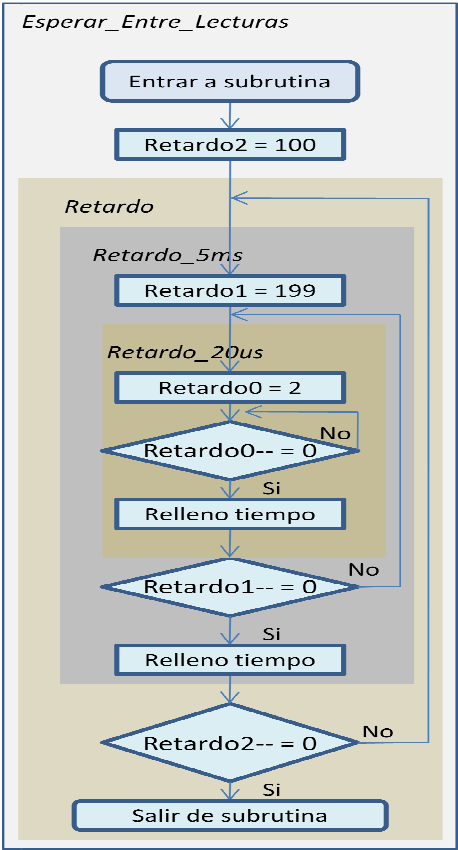


Figura 48. Diagrama de Flujo para espera entre lecturas del transmisor

La Figura 49 muestra la rutina para limpiar el display LCD antes de cada lectura, enviando instrucciones hacia el microcontrolador adicional que funciona como interface con el display LCD mediante un protocolo serial de 2 bits, implementado en el código de manera especial con el fin de disminuir la cantidad de pines utilizados en el microcontrolador principal del sistema de monitoreo. Básicamente la rutina “Enviar_comando_LCD” convierte el comando paralelo enviado hacia el display LCD en un comando serial.

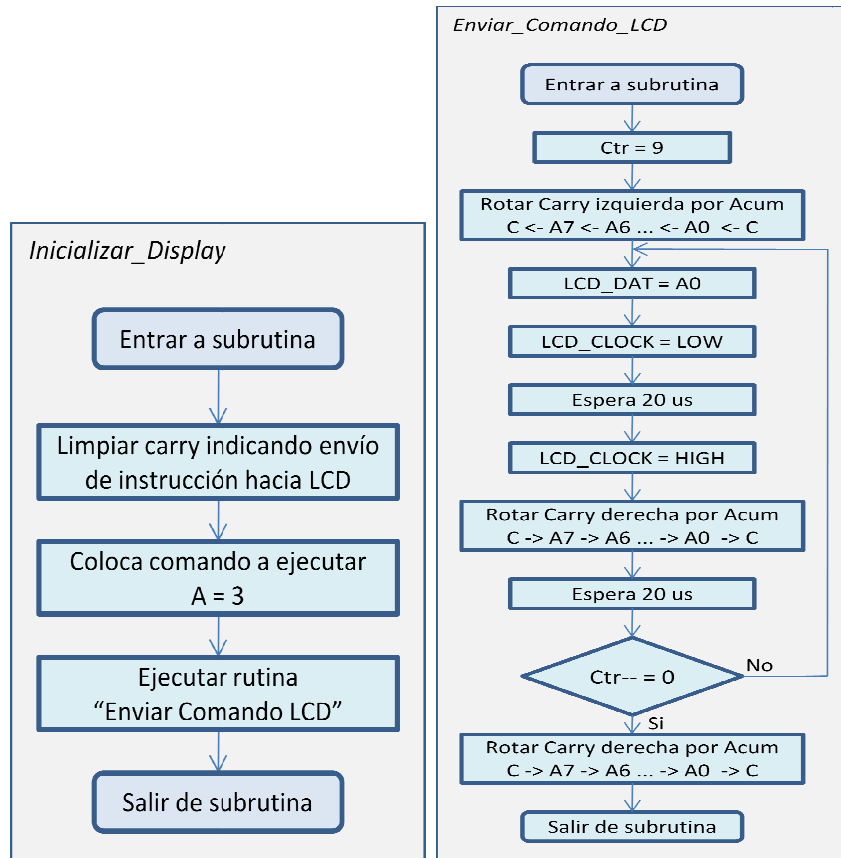


Figura 49. Diagrama de flujo de limpieza de display del transmisor

Para obtener una lectura del nivel de gas se energiza momentáneamente el relevador que controla al sensor de efecto Hall, y se habilita el ADC. El ADC produce 9 bits, ya que el primer bit generado durante el proceso de conversión es un cero lógico (*dummy bit*), como se muestra en la Figura 50. [18]

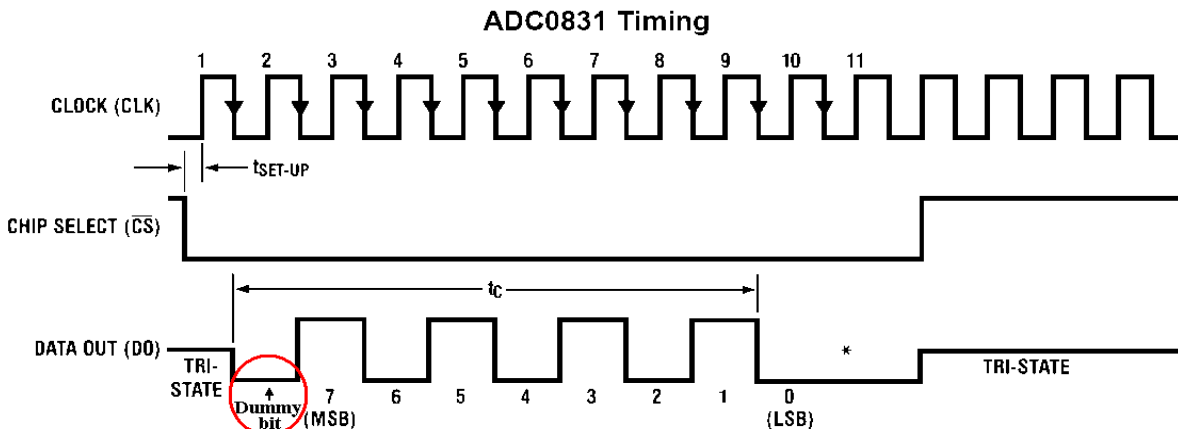


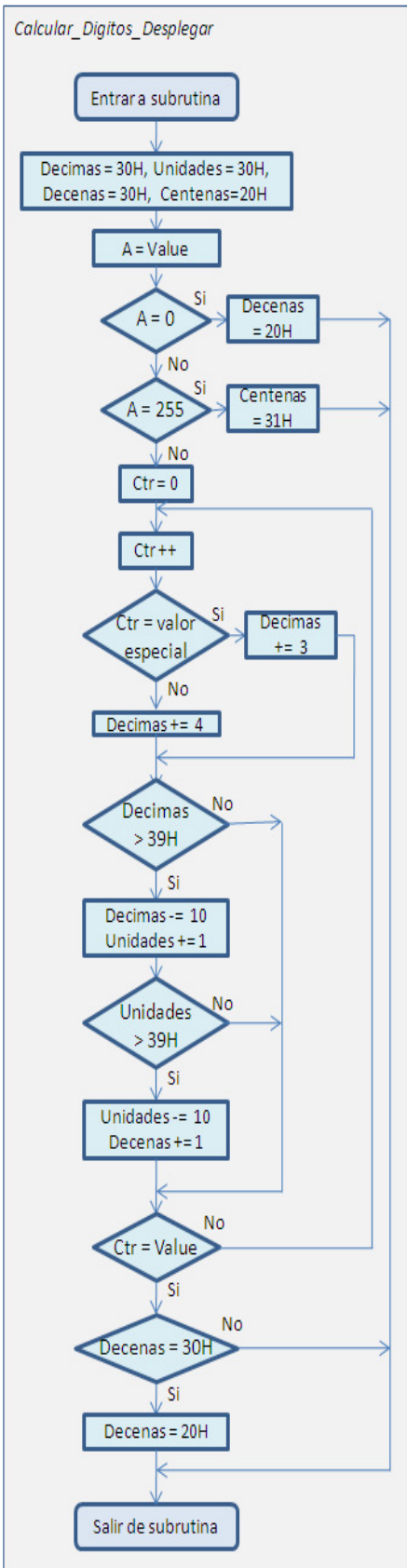
Figura 50. Proceso de conversión del ADC0831C [18]

El *dummy bit* es descartado por el software del sistema propuesto y a continuación se espera a recibir 8 bits en forma serial. El byte obtenido se almacena y se deshabilitan el ADC y el relevador. La Figura 51 muestra esta secuencia, en la que el registro SIOR guarda el byte recibido de manera serial.



Figura 51. Diagrama de flujo de lectura del sensor de efecto Hall del transmisor propuesto

El byte con la lectura obtenida debe ser transformado a datos que se enviarán posteriormente al módulo XBEE y al display LCD. Esta conversión se realiza mediante comparaciones sucesivas que van acumulando incrementos de 0.3% o de 0.4% en el registro de las décimas de porcentaje. Esta variación ocurre porque el rango total (100%) se ajusta a 255 cuentas, correspondiendo 0.392% por cuenta, la cual se ajusta para mantener la precisión. En el caso de existir desborde (overflow), se acumula en las unidades y en las decenas. El ciclo de comparación termina hasta que el valor del contador del ciclo es igual al valor de la lectura obtenida inicialmente. Por último se ajusta el formato del resultado obtenido, para no mostrar ceros a la izquierda en los dígitos a mostrar en el display LCD. El algoritmo para realizar esta conversión se muestra en la Figura 52.



```

; Rutina para convertir el byte almacenado en registro Value a digitos para display LCD
; Valores de salida almacenados en los registros Decimas, Unidades, Decenas, Centenas
.SECT Calcular_Digitos_Desplegar, rom, ABS=0CE
Calcular_Digitos_Desplegar:
LD Decimas, #030 ; Cargar valor inicial "0"
LD Unidades, #030 ; Cargar valor inicial "0"
LD Decenas, #030 ; Cargar valor inicial "0"
LD Centenas, #020 ; Cargar valor inicial " "
LD A, Value
IFEQ A, #000 ; Si lectura es cero arregla decenas y sale
JMP Colocar_No_Decenas
IFEQ A, #0FF ; Si es FF arregla centenas y sale
JMP Colocar_Una_Centena
; Para los demas valores, hace un ciclo sumando 4 decimas (resolucion 0.4% por cuenta)
; y haciendo ajustes predefinidos para correccion de decimales de precision
; Para valores predefinidos coloca en Carry si se requiere hacer un ajuste de 3 cuentas
LD Ctr, #000
Ciclo_Conversion:
LD A, Ctr
INC A
X A, Ctr
LD A, Ctr
RC
IFEQ A, #7
SC
IFEQ A, #20
SC
IFEQ A, #32
SC
IFEQ A, #45
SC
IFEQ A, #58
SC
IFEQ A, #71
SC
IFEQ A, #83
SC
IFEQ A, #96
SC
IFEQ A, #109
SC
IFEQ A, #122
SC
IFEQ A, #134
SC
IFEQ A, #147
SC
IFEQ A, #160
SC
IFEQ A, #173
SC
IFEQ A, #185
SC
IFEQ A, #198
SC
IFEQ A, #198
SC
IFEQ A, #211
SC
IFEQ A, #224
SC
IFEQ A, #236
SC
IFEQ A, #249
SC
LD A, Decimas
IFC ; Si hay Carry entonces ajustar intervalo en A
JP Ajustar_Intervalo
ADD A, #004
JP Checar_Desborde_Decimas
Ajustar_Intervalo:
ADD A, #003
Checar_Desborde_Decimas:
IFGT A, #039
JP Desborde_Decimas
X A, Decimas
JMP Checar_Finalizacion_Ciclo
Desborde_Decimas:
SC
SUBC A, #00A
X A, Decimas
LD A, Unidades
INC A
IFGT A, #039
JP Desborde_Unidades
X A, Unidades
JMP Checar_Finalizacion_Ciclo
Desborde_Unidades:
SC
SUBC A, #00A
X A, Unidades
LD A, Decenas
INC A
X A, Decenas
Checar_Finalizacion_Ciclo:
LD A, Ctr
IFNE A, Value ; Si el contador llego al valor buscado termina la conversion
JMP Ciclo_Conversion
IFEQ Decenas, #030 ; Checar si formato de decenas necesita arreglarse
LD Decenas, #020
JMP Exit_Conversion
Colocar_Una_Centena:
LD Centenas, #031
JMP Exit_Conversion
Colocar_No_Decenas:
LD Decenas, #020
Exit_Conversion:
RET
  
```

Figura 52. Algoritmo de conversión lectura a dígitos del transmisor

Por último los dígitos resultantes se enviarán mediante un *SwUART* (rutina “Enviar_Byte_SWUART”, que construye la trama a enviar en el UART a 9600 bauds) y el protocolo serial LCD de 2 bits. Este proceso se ilustra en la Figura 53.

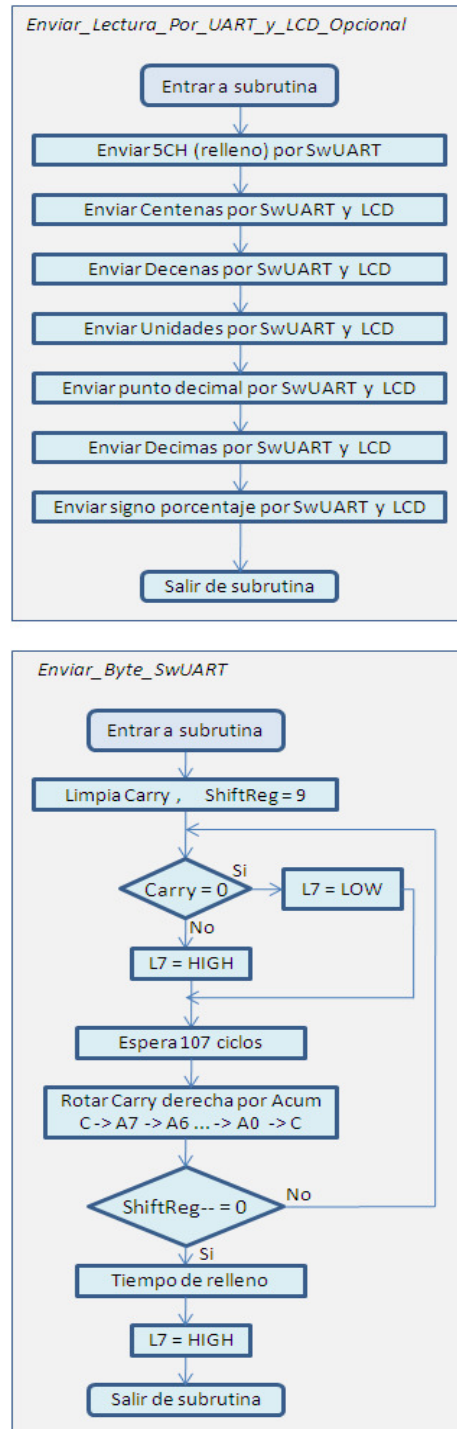


Figura 53. Envío de dígitos por SwUART al módulo XBEE-Pro y por puerto serial

En el Cuadro 4 se muestran los posibles valores obtenidos mediante la rutina “Calcular_Digitos_Desplegar” para convertir las cuentas leídas del ADC a porcentaje de llenado del tanque de gas LP.

Cuadro 4. Conversión de cuentas del ADC a porcentaje de llenado del tanque de gas LP

Cuentas ADC	% Llenado	Cuentas ADC	% Llenado	Cuentas ADC	% Llenado	Cuentas ADC	% Llenado	Cuentas ADC	% Llenado
0	0.0%	52	20.4%	104	40.8%	156	61.2%	208	81.6%
1	0.4%	53	20.8%	105	41.2%	157	61.6%	209	82.0%
2	0.8%	54	21.2%	106	41.6%	158	62.0%	210	82.4%
3	1.2%	55	21.6%	107	42.0%	159	62.4%	211	82.7%
4	1.6%	56	22.0%	108	42.4%	160	62.7%	212	83.1%
5	2.0%	57	22.4%	109	42.7%	161	63.1%	213	83.5%
6	2.4%	58	22.7%	110	43.1%	162	63.5%	214	83.9%
7	2.7%	59	23.1%	111	43.5%	163	63.9%	215	84.3%
8	3.1%	60	23.5%	112	43.9%	164	64.3%	216	84.7%
9	3.5%	61	23.9%	113	44.3%	165	64.7%	217	85.1%
10	3.9%	62	24.3%	114	44.7%	166	65.1%	218	85.5%
11	4.3%	63	24.7%	115	45.1%	167	65.5%	219	85.9%
12	4.7%	64	25.1%	116	45.5%	168	65.9%	220	86.3%
13	5.1%	65	25.5%	117	45.9%	169	66.3%	221	86.7%
14	5.5%	66	25.9%	118	46.3%	170	66.7%	222	87.1%
15	5.9%	67	26.3%	119	46.7%	171	67.1%	223	87.5%
16	6.3%	68	26.7%	120	47.1%	172	67.5%	224	87.8%
17	6.7%	69	27.1%	121	47.5%	173	67.8%	225	88.2%
18	7.1%	70	27.5%	122	47.8%	174	68.2%	226	88.6%
19	7.5%	71	27.8%	123	48.2%	175	68.6%	227	89.0%
20	7.8%	72	28.2%	124	48.6%	176	69.0%	228	89.4%
21	8.2%	73	28.6%	125	49.0%	177	69.4%	229	89.8%
22	8.6%	74	29.0%	126	49.4%	178	69.8%	230	90.2%
23	9.0%	75	29.4%	127	49.8%	179	70.2%	231	90.6%
24	9.4%	76	29.8%	128	50.2%	180	70.6%	232	91.0%
25	9.8%	77	30.2%	129	50.6%	181	71.0%	233	91.4%
26	10.2%	78	30.6%	130	51.0%	182	71.4%	234	91.8%
27	10.6%	79	31.0%	131	51.4%	183	71.8%	235	92.2%
28	11.0%	80	31.4%	132	51.8%	184	72.2%	236	92.5%
29	11.4%	81	31.8%	133	52.2%	185	72.5%	237	92.9%
30	11.8%	82	32.2%	134	52.5%	186	72.9%	238	93.3%
31	12.2%	83	32.5%	135	52.9%	187	73.3%	239	93.7%
32	12.5%	84	32.9%	136	53.3%	188	73.7%	240	94.1%
33	12.9%	85	33.3%	137	53.7%	189	74.1%	241	94.5%
34	13.3%	86	33.7%	138	54.1%	190	74.5%	242	94.9%
35	13.7%	87	34.1%	139	54.5%	191	74.9%	243	95.3%
36	14.1%	88	34.5%	140	54.9%	192	75.3%	244	95.7%
37	14.5%	89	34.9%	141	55.3%	193	75.7%	245	96.1%
38	14.9%	90	35.3%	142	55.7%	194	76.1%	246	96.5%
39	15.3%	91	35.7%	143	56.1%	195	76.5%	247	96.9%
40	15.7%	92	36.1%	144	56.5%	196	76.9%	248	97.3%
41	16.1%	93	36.5%	145	56.9%	197	77.3%	249	97.6%
42	16.5%	94	36.9%	146	57.3%	198	77.6%	250	98.0%
43	16.9%	95	37.3%	147	57.6%	199	78.0%	251	98.4%
44	17.3%	96	37.6%	148	58.0%	200	78.4%	252	98.8%
45	17.6%	97	38.0%	149	58.4%	201	78.8%	253	99.2%
46	18.0%	98	38.4%	150	58.8%	202	79.2%	254	99.6%
47	18.4%	99	38.8%	151	59.2%	203	79.6%	255	100.0%
48	18.8%	100	39.2%	152	59.6%	204	80.0%		
49	19.2%	101	39.6%	153	60.0%	205	80.4%		
50	19.6%	102	40.0%	154	60.4%	206	80.8%		
51	20.0%	103	40.4%	155	60.8%	207	81.2%		

El circuito del transmisor implementado se muestra en la Figura 54.

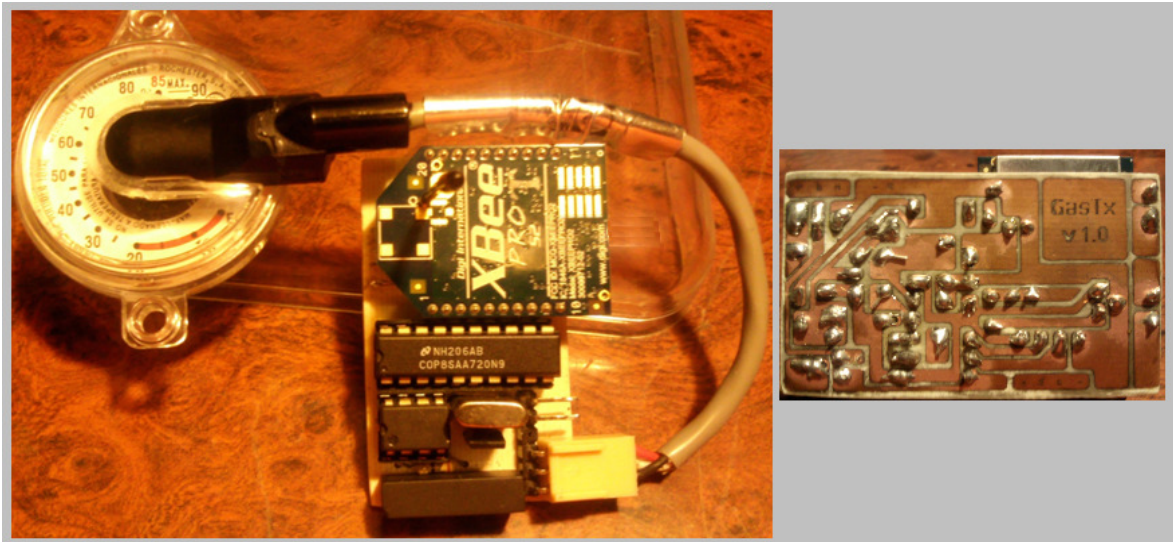


Figura 54. Implementación del circuito del transmisor sin el LCD opcional

3.2.4. Implementación del display LCD del sistema (opcional para el subsistema transmisor)

De manera opcional se cuenta con un display LCD que permite visualizar las lecturas registradas por el transmisor, con el fin de comparar las lecturas del transmisor y del receptor. El controlador que maneja este display se usa también en el circuito receptor. Las tareas básicas realizadas por el circuito del controlador del display LCD se muestran en el diagrama de flujo de la Figura 55.

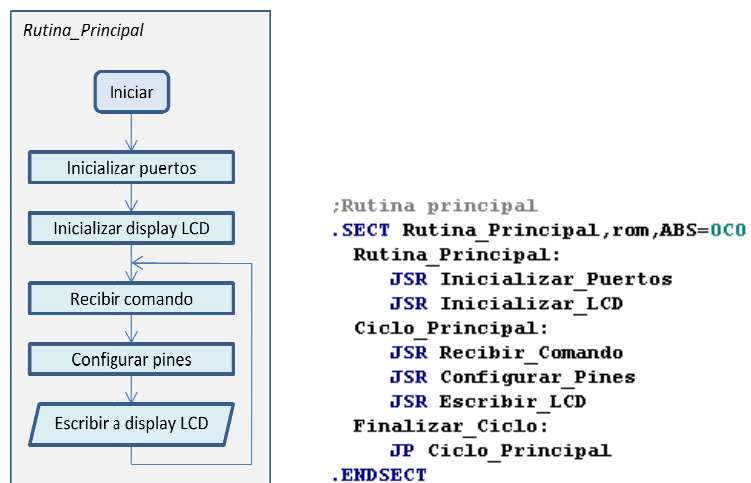


Figura 55. Tareas básicas del software del controlador del display LCD

En la Figura 56 se muestran las rutinas para generar los tiempos de retardo utilizadas por el controlador del display LCD.

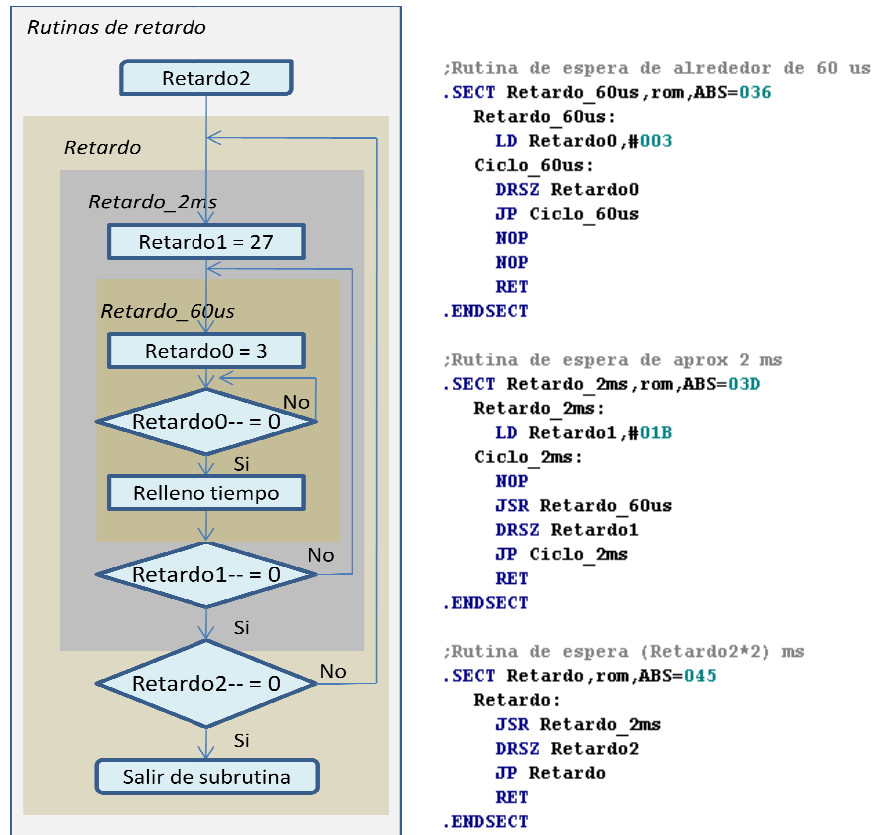


Figura 56. Rutinas de retardo del controlador de display LCD

La rutina “Escribir_LCD” mostrada en la Figura 57 controla el pin G0 de habilitación para que el display LCD lea el comando (compatible con la interface de comandos HD44780) enviado mediante los 8 pines del puerto L.

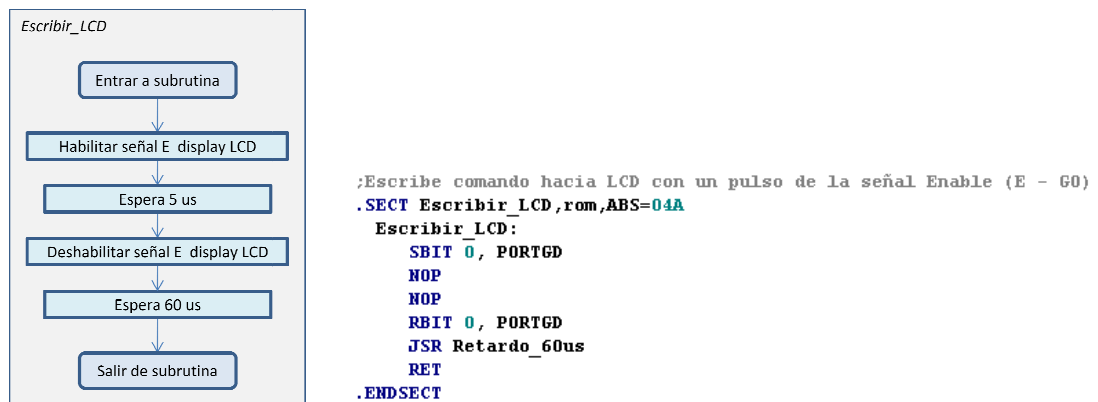


Figura 57. Rutina para enviar comandos al display LCD

Los comandos a ejecutar en el display LCD se reciben mediante los pines G6 y G7 del controlador del display LCD. Mediante un ciclo que va introduciendo y rotando un bit a la vez se reciben y se almacenan 9 bits en el Acumulador A y en Carry. El proceso se muestra en la Figura 58.

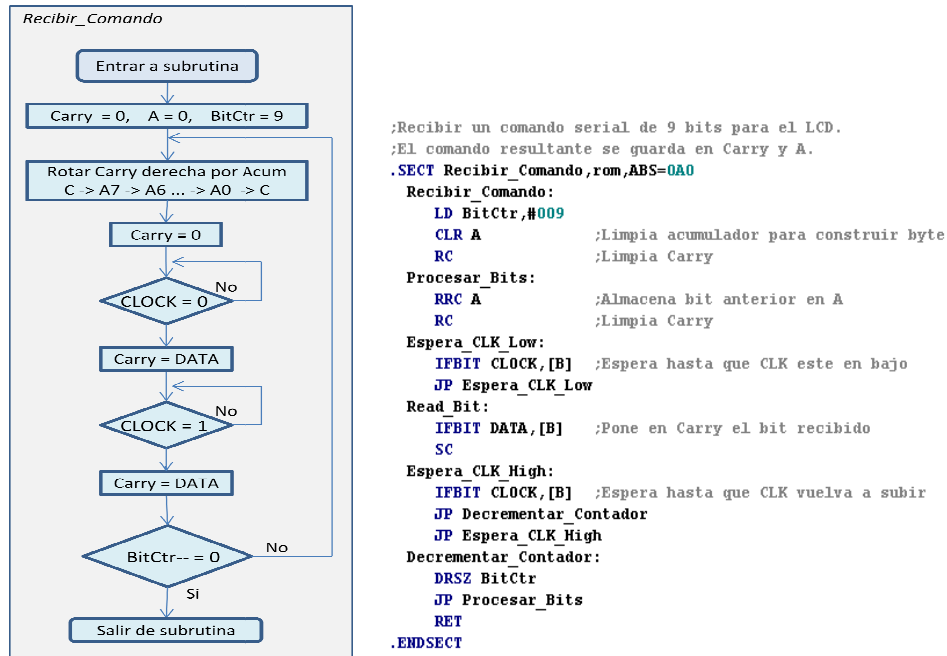


Figura 58. Rutina de recepción de comandos del display LCD

El comando guardado en el Acumulador A y en Carry se traslada hacia los pines que directamente comandan al display LCD mediante la rutina “*Configurar Pines*”, que se muestra en la Figura 59. El puerto L y el pin G1 se usan para definir el comando en el display LCD, quedando listo para que posteriormente un pulso positivo aplicado al pin G0 ejecute el comando.

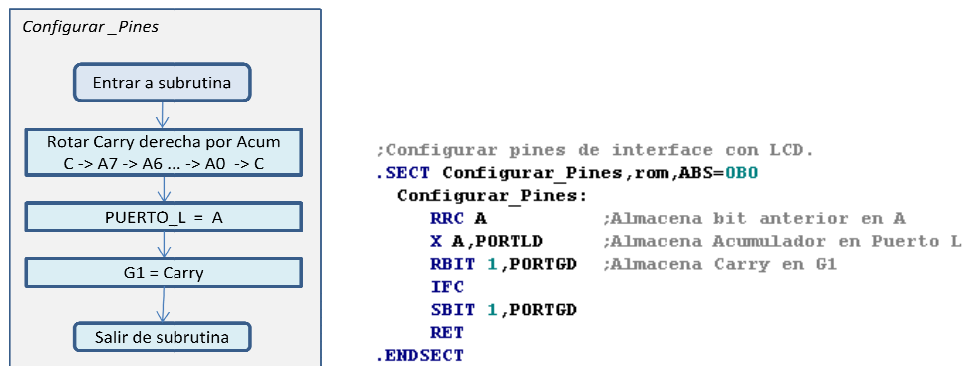


Figura 59. Rutina de configuración de pines del display LCD

El circuito del display LCD se muestra en la Figura 60. Se comunica con el circuito transmisor mediante un protocolo serial de 2 bits implementado en la rutina “*Enviar_Comando_LCD*”, con el fin de reducir la cantidad de pines requeridos del microcontrolador principal.

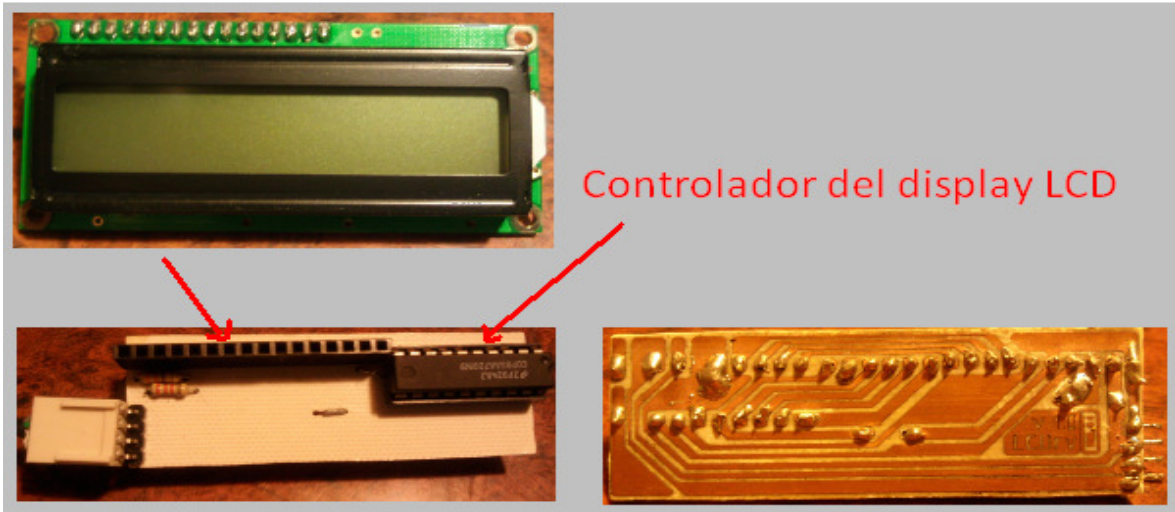


Figura 60. Implementación del circuito del display LCD opcional

3.2.5. Implementación del receptor del sistema

El receptor se implementó conforme al diagrama funcional de bloques de la Figura 61.

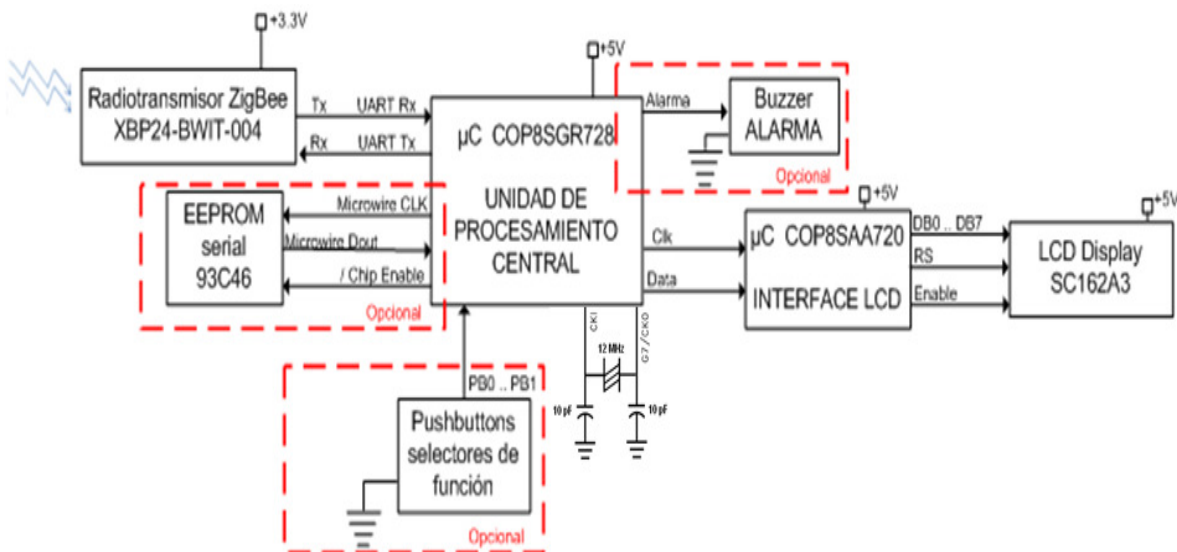


Figura 61. Diagrama funcional del receptor del sistema de monitoreo de nivel de gas LP

Las tareas básicas realizadas por el circuito de recepción y despliegue de datos del sistema propuesto se muestran en la Figura 62.

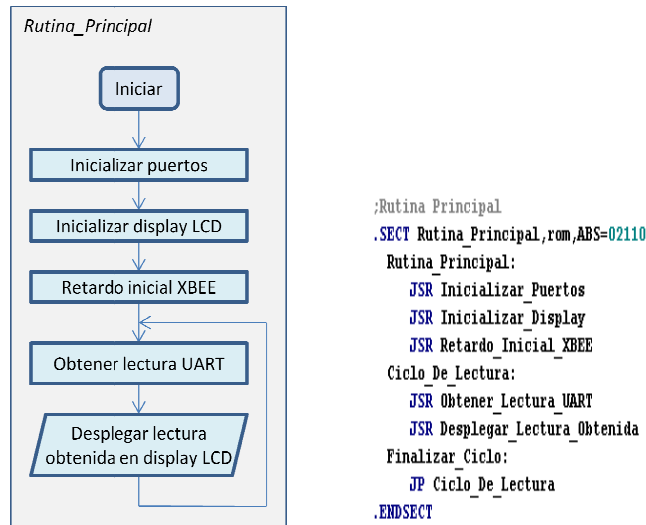


Figura 62. Tareas básicas del software del receptor

En la rutina de inicialización de puertos del receptor mostrada en la Figura 63 se definen los pines de los puertos G, D, L y F del microcontrolador COP8 como entradas o salidas.

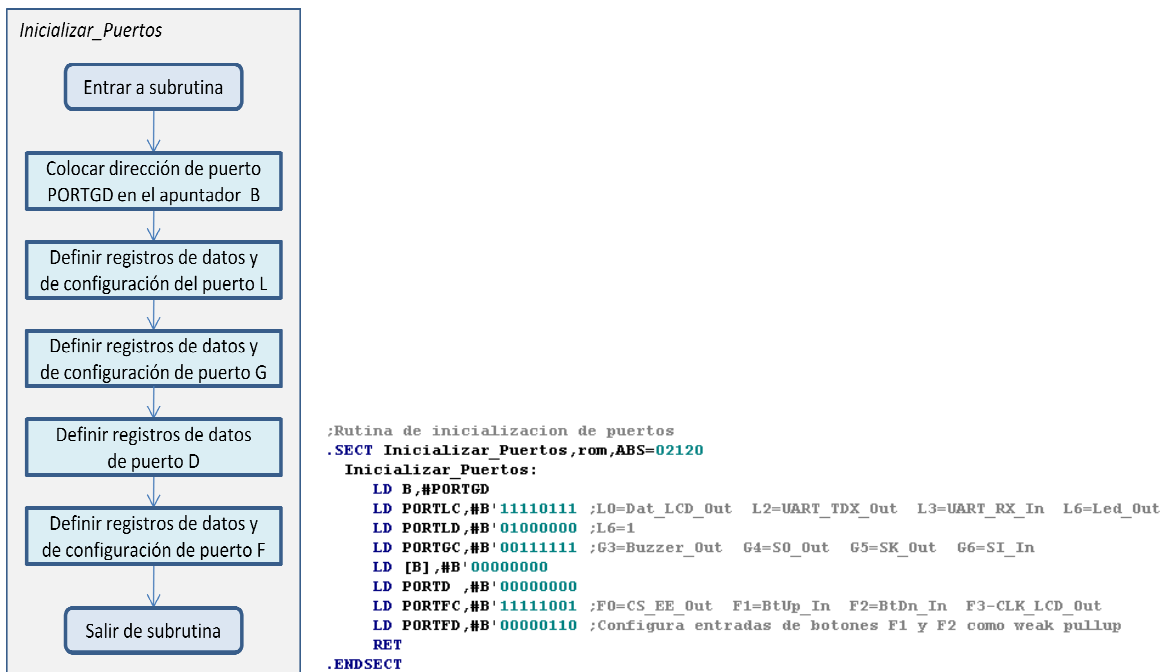


Figura 63. Rutina de inicialización del receptor

En la Figura 49 se muestra la inicialización del display LCD donde se desplegarán las lecturas recibidas por medio del radiotransmisor ZigBee. Se envía una serie de comandos para inicializar al display LCD definidos por la interface de comandos HTD4480 (espera inicial, definir el conjunto de funciones aplicables al LCD, Limpiar el display LCD, definir el modo de entrada del LCD a 8 bits y por último encender el display LCD). Como parte de la inicialización se añade también el texto “Nivel de gas” en la primera línea del display LCD, tomando la información de una tabla en ROM.

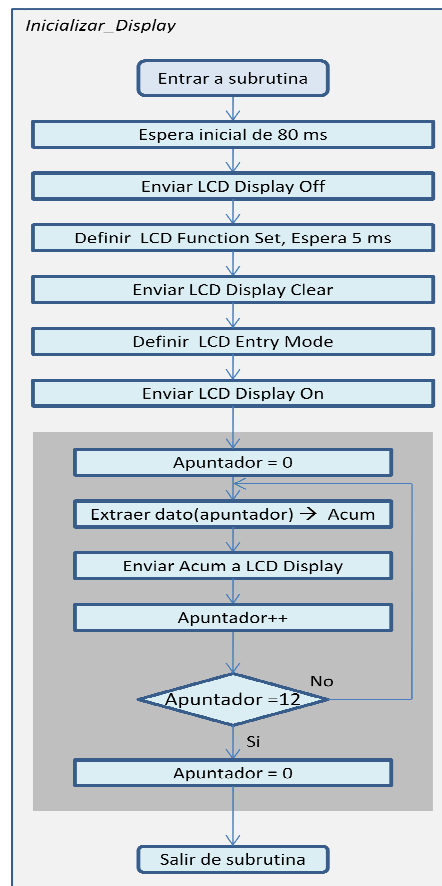


Figura 64. Diagrama de flujo de inicialización del display LCD del receptor

Cuando se energiza el receptor XBEE se deberá esperar un tiempo inicial de alrededor de 4 segundos antes de estar en posibilidad de recibir mensajes, debido al proceso de asociación que se ejecuta para integrar al receptor a la red ZigBee del coordinador. Este retardo inicial se implementó en el software del receptor como se muestra en la Figura 65.

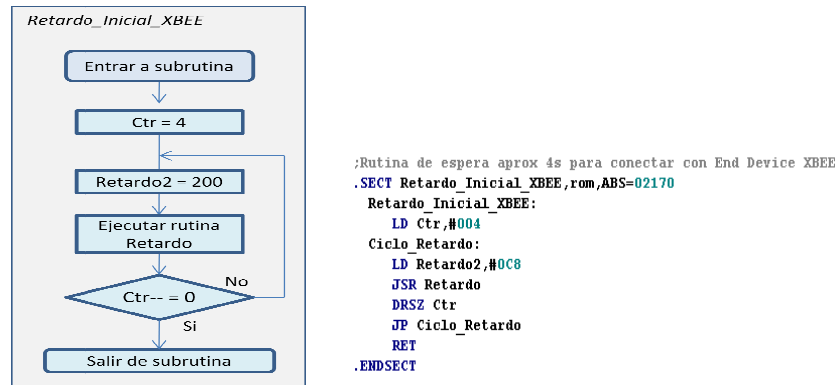


Figura 65. Rutina de espera inicial del receptor XBEE

Las rutinas de retardo empleadas en el software del receptor se muestran en la Figura 66.

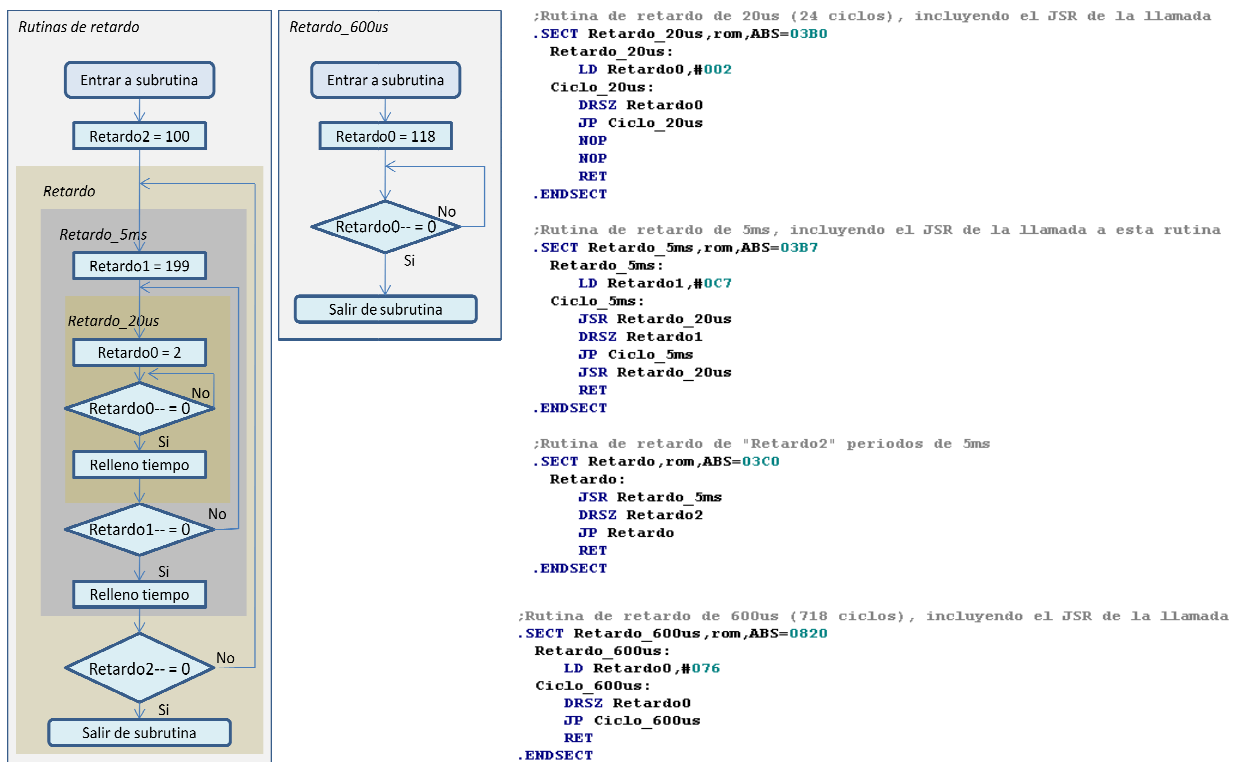


Figura 66. Rutinas de retardo utilizadas en el software del receptor

Para el control del display LCD donde se desplegarán las lecturas recibidas se utiliza el protocolo de 2 bits implementado, siguiendo los diagramas mostrados en la Figura 67.

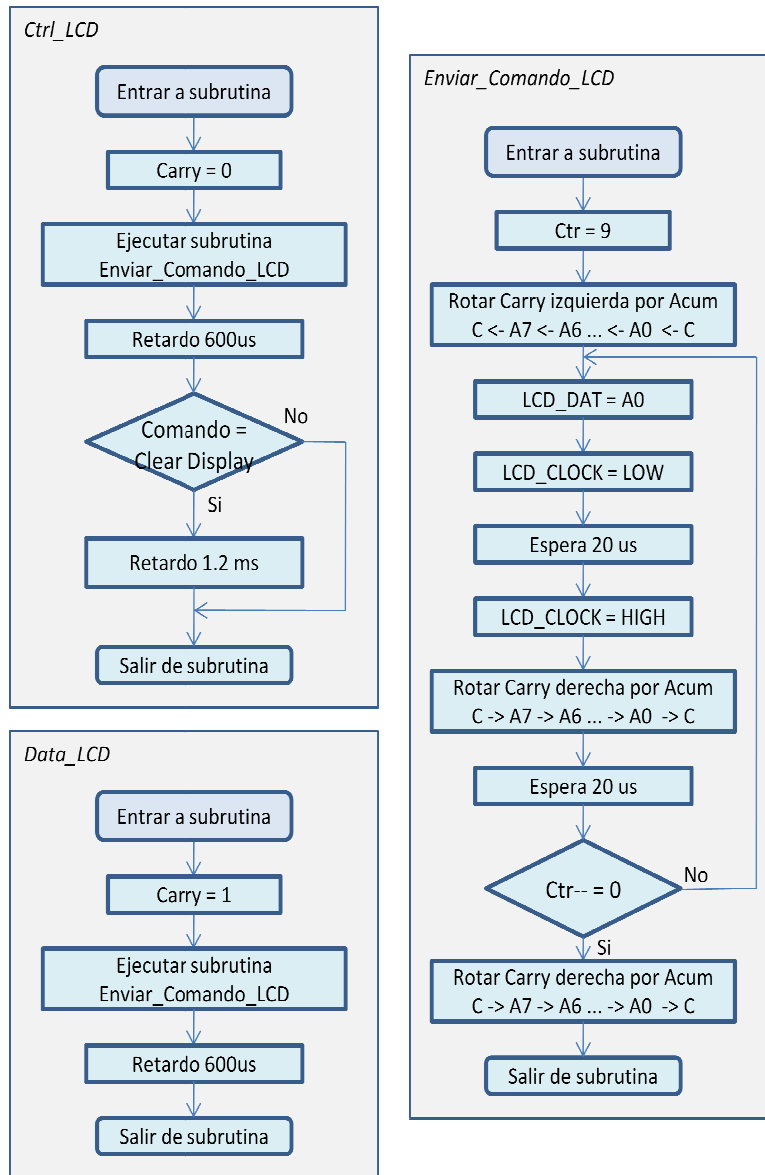
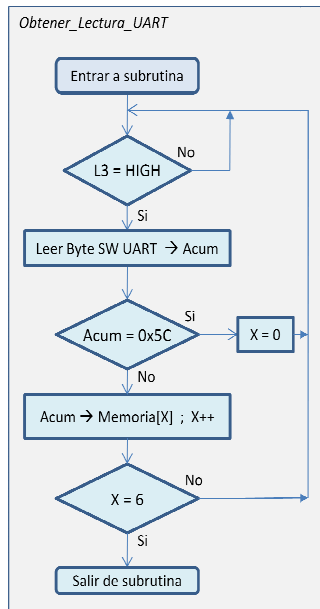


Figura 67. Diagramas de flujo para el despliegue de lectura del receptor

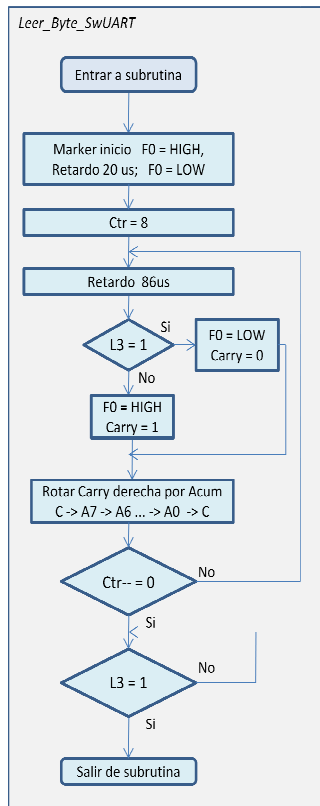
Los datos recibidos en el transceiver de ZigBee comienzan con un byte de relleno (0x5C) el cual es descartado, para posteriormente almacenar 6 bytes de datos en las direcciones de memoria 0 a 5. La Figura 68 muestra esta rutina (“Obtener_Lectura_UART”), así como la rutina “Leer_Byte_SwUART” para la lectura de un byte de datos a partir de la señal de UART invertida recibida del módulo XBEE, buscando el inicio de la trama, esperando ½ bit para comenzar la lectura de la señal, y después hacer un ciclo para leer los 8 bits, cada uno de los cuales tiene una duración de 104µs, correspondientes a 9600 bauds.



;Rutina para obtener lectura de UART y almacenarla en direcciones de memoria 00 a 05
.SECT Obtener_Lectura_UART,rom,ABS=02180

```

Obtener_Lectura_UART:
  IFBIT 3,PORTLP ;Espera inicio de frame de señal invertida UART RX
  JP Frame_Detectado
  JP Obtener_Lectura_UART
Frame_Detectado:
  JSR Leer_Byte_SW_UART ;Obtener un byte de UART RX
  IFEQ A,#05C ;Si el dato obtenido es relleno (0x5C) desechar todo el frame
  JP Descartar_Relleno
  JP Almacenar_Byte
Descartar_Relleno:
  LD X,#000
  JP Obtener_Lectura_UART
Almacenar_Byte:
  X A,[X+]
  IFEQ X,#006
  JP Lectura_Completada
  JP Obtener_Lectura_UART
Lectura_Completada:
  RET
.ENDSECT
  
```



;Rutina de recepcion por SW-UART 9600 bps señal invertida
 ;Se almacena dato recibido en A, Rx=L3

```

.SECT Leer_Byte_SW_UART,rom,ABS=021B0
Leer_Byte_SW_UART:
  SBIT 0,PORTFD
  JSR Retardo_20us ;Desfasar aprox 0.5 bit
  RBIT 0,PORTFD
  LD Ctr,#008 ;Generar ciclo para leer 8 bits
Ciclo_Lectura_Byte:
  JSR Retardo_20us ;Generar retardo para que toda la rutina se ejecute en 104us
  JSR Retardo_20us
  JSR Retardo_20us
  JSR Retardo_20us
  NOP
  NOP
  NOP
  NOP
  NOP
  NOP
  IFBIT 3,PORTLP
  JP Limpiar_Carry
  SBIT 0,PORTFD
  SC
  JP Rotar_Bit
Limpiar_Carry:
  RBIT 0,PORTFD
  RC
Rotar_Bit:
  RRC A
  DRSZ Ctr
  JP Ciclo_Lectura_Byte
Esperar_Stop_Bit:
  IFBIT 3,PORTLP
  JP Esperar_Stop_Bit
  RET
.ENDSECT
  
```

Figura 68. Rutina de lectura UART del receptor

Una vez que se tienen los 6 bytes almacenados en memoria, se envían a la segunda línea del display LCD mediante un comando transmitido usando el protocolo de 2 bits. Esta rutina se describe en la Figura 69.

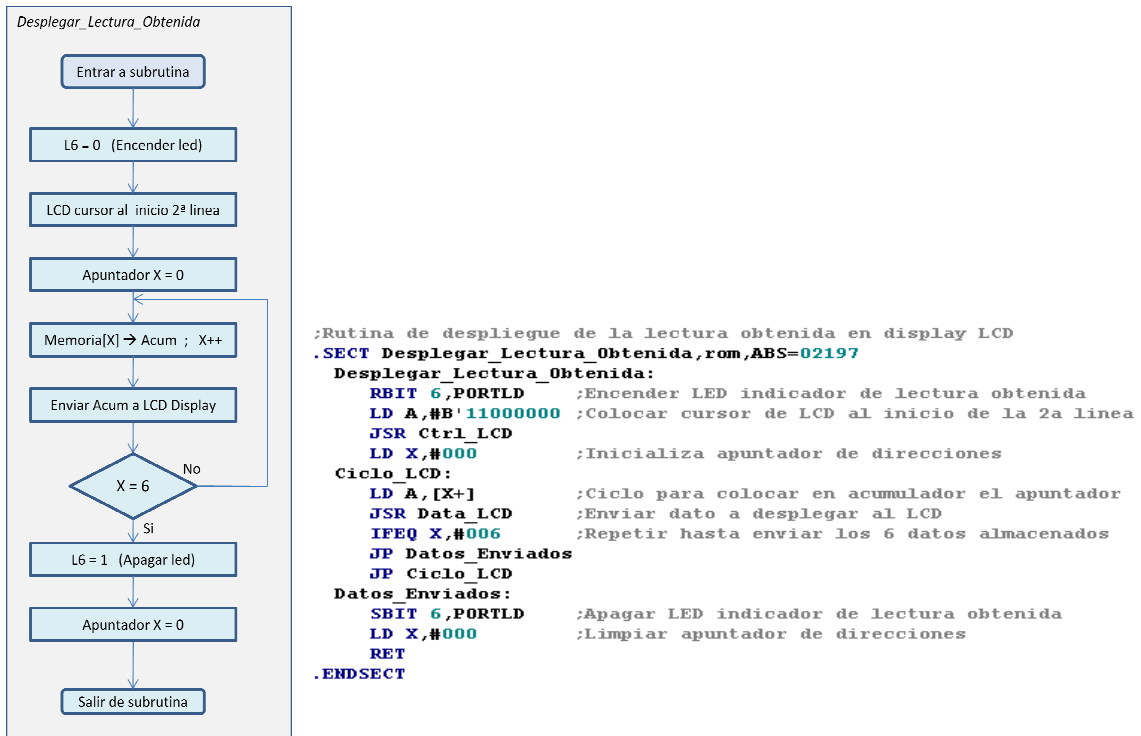


Figura 69. Rutina de despliegue de lectura en display LCD del receptor

Asimismo, el circuito del receptor implementado se muestra en la Figura 70.

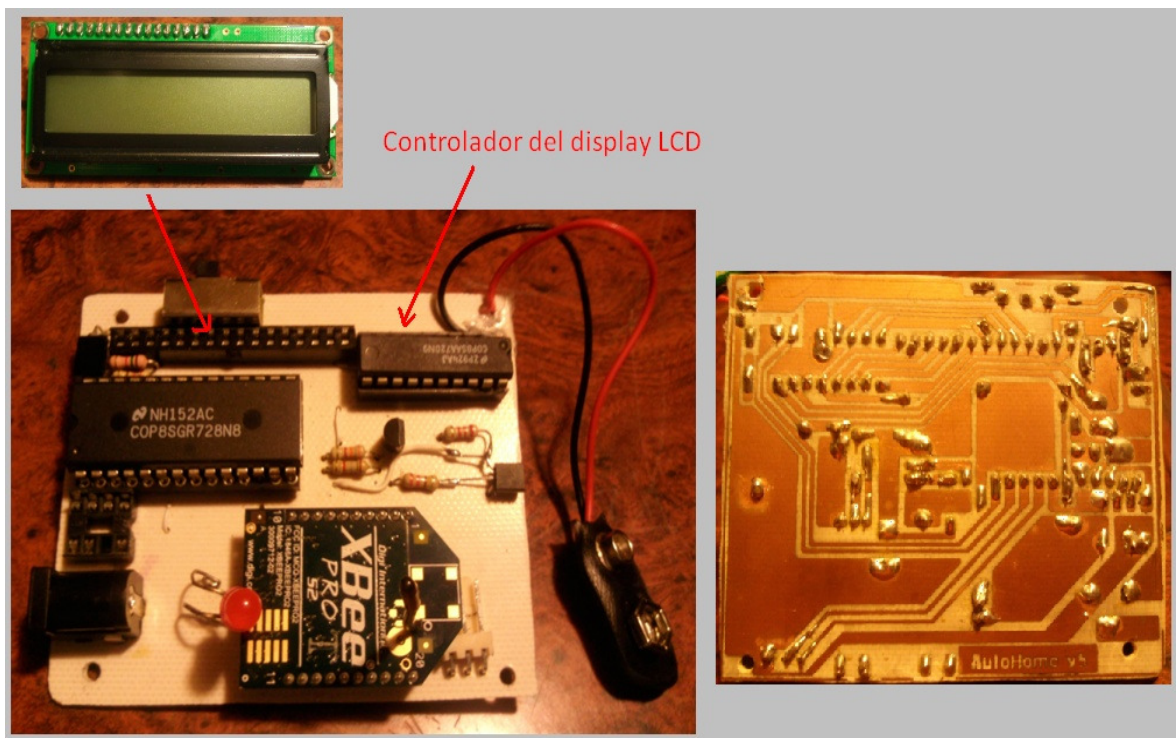
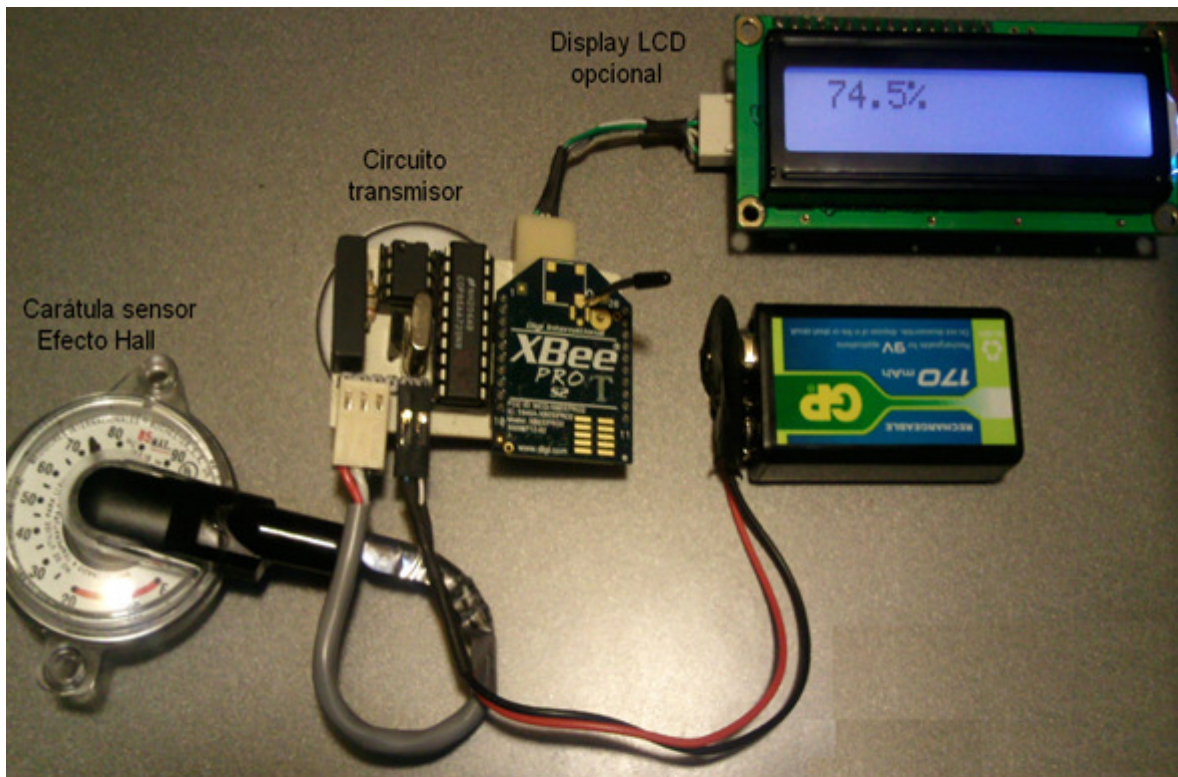


Figura 70. Implementación del circuito del receptor

En la Figura 71 se observan imágenes del sistema de medición de nivel de gas LP propuesto funcionando en modo de operación normal.



(a)



(b)

Figura 71. Sistema de medición propuesto en operación normal: (a) Subsistema de medición y transmisión ; (b) Subsistema de recepción y monitoreo

3.3. Instrumentación de pruebas

Para realizar las mediciones de prueba se usó un firmware modificado en el microcontrolador COP8 del transmisor para generar mensajes con información incremental y tiempo variable entre mensajes, y así identificar y contar en el receptor los mensajes correctamente recibidos.

Asimismo se utilizó un Analizador Lógico IkaLogic de 4 canales modelo Scanalogic2 para monitorear la correcta decodificación de la señal UART_Rx del módulo ZigBee del receptor del sistema propuesto, así como el mensaje enviado mediante el protocolo de 2 bits hacia el display LCD. En la Figura 72 se observa el diagrama de conexión del analizador lógico al sistema de monitoreo. [55]

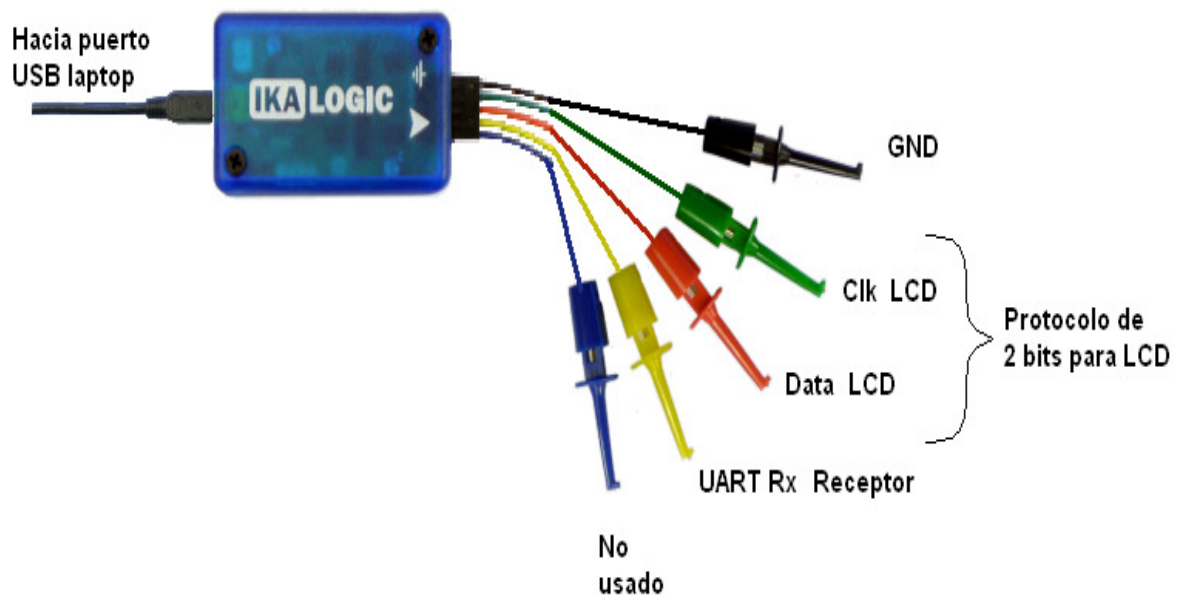


Figura 72. Instrumentación de prueba del receptor propuesto con un analizador lógico [55]

En la Figura 73 se observa una imagen obtenida con el analizador lógico en la que se muestran las señales recibidas periódicamente con la información del nivel de gas (señal UART Rx), así como los comandos necesarios en el protocolo de 2 bits para desplegar la lectura en el display LCD (señales CLK_LCD y DATA_LCD).

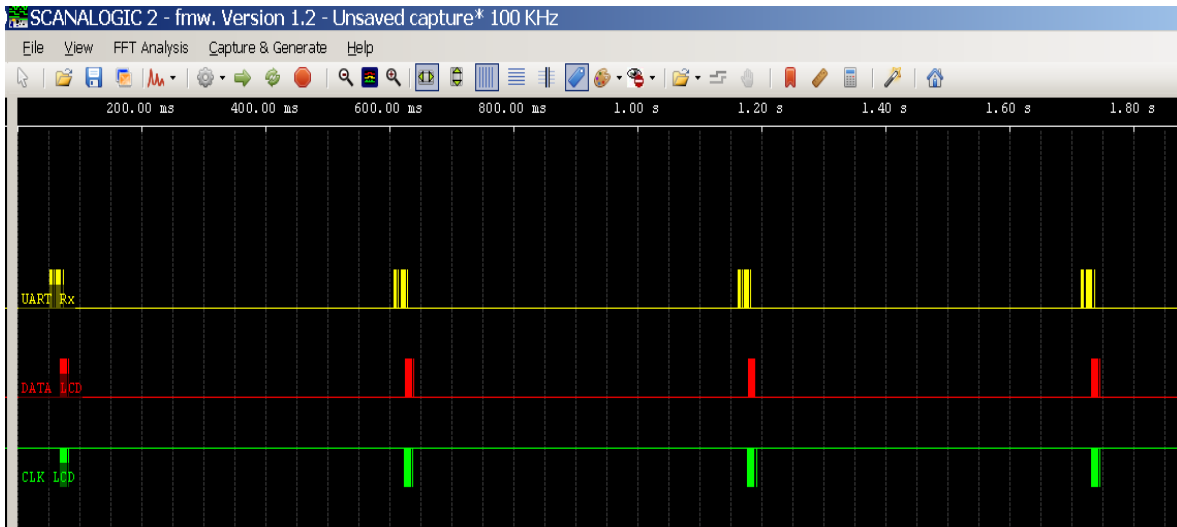


Figura 73. Lectura periódica en el receptor y comandos para display LCD

En la Figura 74 se muestra el detalle de la trama UART recibida (byte 0x5C de relleno y 6 bytes de datos), desplegando la decodificación automática realizada por la herramienta Scanalogic2, la cual confirma que la lectura fue recibida correctamente, y se muestra que a continuación se envía dicha lectura en forma serial hacia el display LCD.

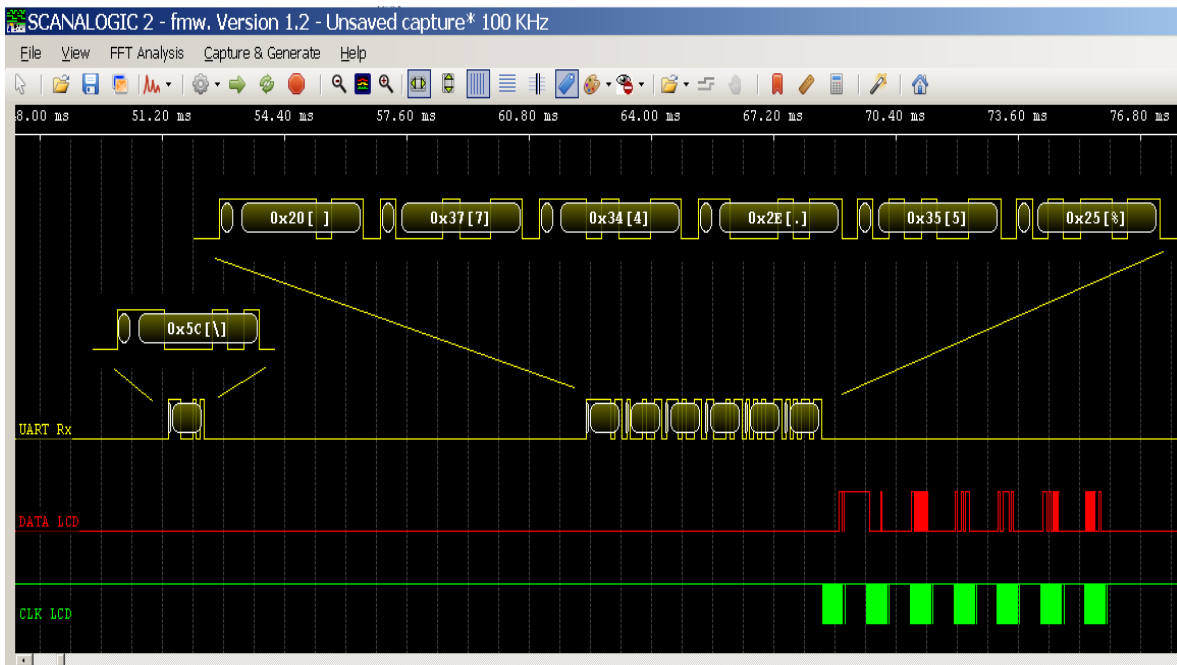


Figura 74. Decodificación UART_Rx en el receptor del sistema y envío de datos al LCD en forma serial

3.4. Estudio Piloto

El objetivo del estudio piloto es caracterizar el rendimiento del sistema propuesto de medición del nivel de gas LP, analizando diferentes variables que inciden en la recepción exitosa de lecturas enviadas por el transmisor del sistema propuesto.

Entre las variables identificadas más importantes se encuentran las siguientes:

- Distancia entre transmisor y receptor.
 - o Se seleccionaron 4 niveles de observación (4 m, 8 m, 12 m y 16 m)
- Número de muros/techos que la señal atraviesa.
 - o Se seleccionaron 3 niveles de observación (0 muros, 2 muros, 4 muros).
- Como variable de respuesta observada se medirá la desviación estándar de los tiempos entre mensajes recibidos en un periodo de 63 segundos.
- Se replicará el experimento 2 veces.

3.5. Recolección y tratamiento de los datos

Para la recolección de datos se usará una secuencia aleatoria combinando todos los factores. Dicha secuencia se muestra en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Secuencia de recolección de datos para caracterizar el sistema [19]

		Factor 1	Factor 2
Orden	Consecutivo	A:Distancia	B:Construcción
		metros	Muros
6	1	8	2
9	2	4	4
11	3	12	4
7	4	12	2
3	5	12	0
5	6	4	2
2	7	8	0
8	8	16	2
12	9	16	4
10	10	8	4
1	11	4	0
4	12	16	0

Para el análisis de varianza del diseño factorial con dos factores se usará el Cuadro 6 mostrado a continuación. [21], [51]

Cuadro 6. Análisis de varianza para tratamientos con dos factores. [21]

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F_0
Tratamientos A	SS_A	$a - 1$	$MS_A = \frac{SS_A}{a - 1}$	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$
Tratamientos B	SS_B	$b - 1$	$MS_B = \frac{SS_B}{b - 1}$	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$
Interacción	SS_{AB}	$(a - 1)(b - 1)$	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a - 1)(b - 1)}$	$F_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Error	SS_E	$ab(n - 1)$	$MS_E = \frac{SS_E}{ab(n - 1)}$	
Total	SS_T	$abn - 1$		

Las ecuaciones (3.1) a (3.5) se utilizan en los cálculos de este análisis de varianza. [21]

Suma de cuadrados entre medias marginales de A

$$SS_A = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a y_{i..}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (3.1)$$

Suma de cuadrados entre medias marginales de B

$$SS_B = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b y_{.j.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (3.2)$$

Suma de cuadrados de la interacción AB

$$SS_{AB} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} - SS_A - SS_B \quad (3.3)$$

Suma de cuadrados total

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (3.4)$$

Suma de cuadrados error experimental

$$SS_E = SS_T - SS_{AB} - SS_A - SS_B \quad (3.5)$$

IV. RESULTADOS

4.1. Ejecución del protocolo de pruebas

Para la ejecución del protocolo de pruebas se colocó el prototipo en el techo de una casa habitación, sobre el tanque de gas estacionario, y se modificó el firmware del transmisor para enviar mensajes secuenciales y así poder validar si algún mensaje no fuese recibido. Se configuró el periodo entre mensajes transmitidos a 560 ms. El receptor se colocó en diversas habitaciones y lugares dentro y fuera de la casa para cubrir todos los escenarios de prueba definidos.

Se utilizó el analizador lógico IkaLogic Scanalogic 2 para recolectar muestras durante 63 segundos, con una precisión de lectura de 800 microsegundos. La información recolectada se exportó a una hoja de cálculo y se computó el tiempo en que cada mensaje fue recibido, para después calcular la desviación estándar del tiempo entre los mensajes recibidos.

Este experimento se ejecutó para los 12 escenarios definidos en el protocolo de pruebas, con 2 réplicas. En el Cuadro 7 se muestran los resultados.

Cuadro 7. Datos recolectados al ejecutar el protocolo de pruebas

		Factor 1	Factor 2	Respuesta	
Order	Run	A:Distancia metros	B:Construcción Muros	Desviación estándar entre lecturas	
				lectura 1 (ms)	lectura 2 (ms)
6	1	8	2	9.86	12.32
9	2	4	4	28.90	11.02
11	3	12	4	3.52	8.59
7	4	12	2	12.77	9.12
3	5	12	0	7.24	8.74
5	6	4	2	114.73	8.62
2	7	8	0	9.06	8.75
8	8	16	2	3.63	9.32
12	9	16	4	67.76	12.35
10	10	8	4	8.70	10.75
1	11	4	0	8.67	9.53
4	12	16	0	3.46	11.12

4.2. Análisis de varianza

Los datos recolectados se consolidaron en el Cuadro 8 para iniciar el análisis de varianza.

Cuadro 8. Datos consolidados para análisis de varianza

Distancia (m)	Número de muros						Yi..
	0		2		4		
4	8.67	18.20	114.73	123.35	28.90	39.92	181.47
	9.53		8.62		11.02		
8	9.06	17.81	9.86	22.18	8.70	19.45	59.44
	8.75		12.32		10.75		
12	7.24	15.98	12.77	21.89	3.52	12.11	49.98
	8.74		9.12		8.59		
16	3.46	14.58	3.63	12.95	67.76	80.11	107.64
	11.12		9.32		12.35		
Y.j.	66.57		180.37		151.59		Y... = 398.53

Para el cálculo de la tabla de análisis de varianza (Cuadro 9) se utilizaron las ecuaciones (3.1) a (3.5) y las fórmulas matemáticas del Cuadro 5 del capítulo anterior. A continuación se muestra el detalle.

$$SS_{\text{Distancia}} = (1 / (3)(2)) [(181.47)^2 + (59.44)^2 + (49.98)^2 + (107.64)^2] - (398.53)^2 / (4)(3)(2) = 1,807.05$$

$$SS_{\text{Muros}} = (1 / (4)(2)) [(66.57)^2 + (180.37)^2 + (151.59)^2] - (398.53)^2 / (4)(3)(2) = 875.29$$

$$SS_{\text{Interaccion}} = (1 / 2) [(18.20)^2 + (17.81)^2 + (15.98)^2 + (14.58)^2 + (123.35)^2 + (22.18)^2 + (21.89)^2 + (12.95)^2 + (39.92)^2 + (19.45)^2 + (12.11)^2 + (80.11)^2] - (398.53)^2 / (4)(3)(2) - 1,807.05 - 875.29 = 3,703.20$$

$$SS_{\text{Total}} = [(8.67)^2 + (9.53)^2 + (9.06)^2 + (8.75)^2 + (7.24)^2 + (8.74)^2 + (3.46)^2 + (11.12)^2 + (114.73)^2 + (8.62)^2 + (9.86)^2 + (12.32)^2 + (12.77)^2 + (9.12)^2 + (3.63)^2 + (9.32)^2 +$$

$$(28.90)^2 + (11.02)^2 + (8.70)^2 + (10.75)^2 + (3.52)^2 + (8.59)^2 + (67.76)^2 + (12.35)^2 - (398.53)^2 / (4)(3)(2) = 13,781.89$$

$$SS_{Error} = 13781.89 - 1807.05 - 875.29 - 3703.20 = 7,396.35$$

Cuadro 9. Tabla calculada del análisis de varianza del experimento realizado

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	P
Distancia Tx-Rx	1,807.05	3	602.35	0.97727	0.436
Número de muros	875.29	2	437.65	0.71006	0.511
Interacción	3,703.20	6	617.2	1.00136	0.467
Error	7,396.35	12	616.36		
TOTAL	13,781.89	23			

A partir de los datos recolectados previamente y utilizando Minitab se generaron las gráficas de las Figuras 60, 61 y 62. [56]

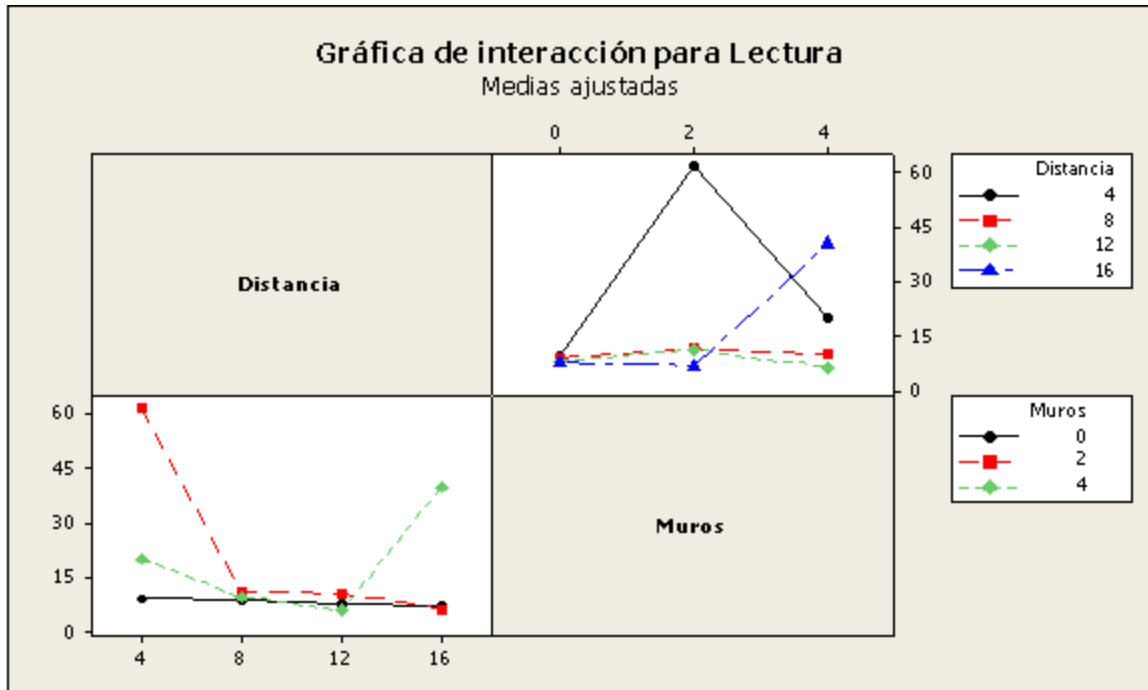


Figura 75. Gráfica de interacción para las lecturas obtenidas

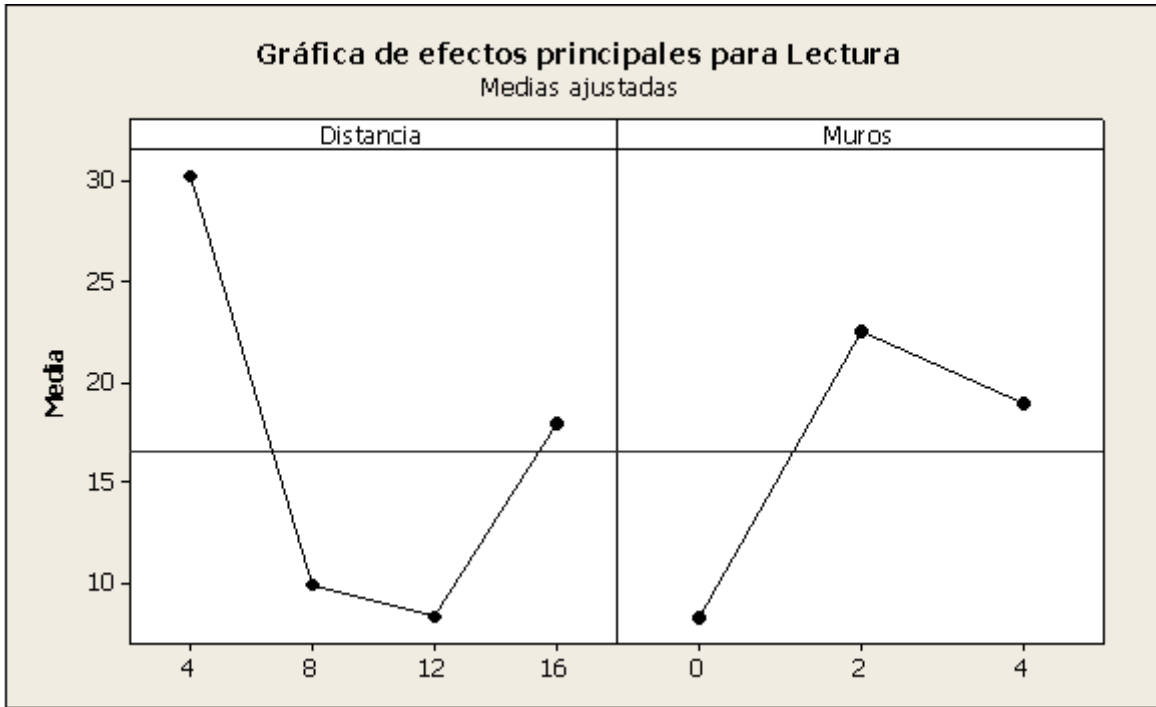


Figura 76. Gráfica de efectos principales para las lecturas obtenidas

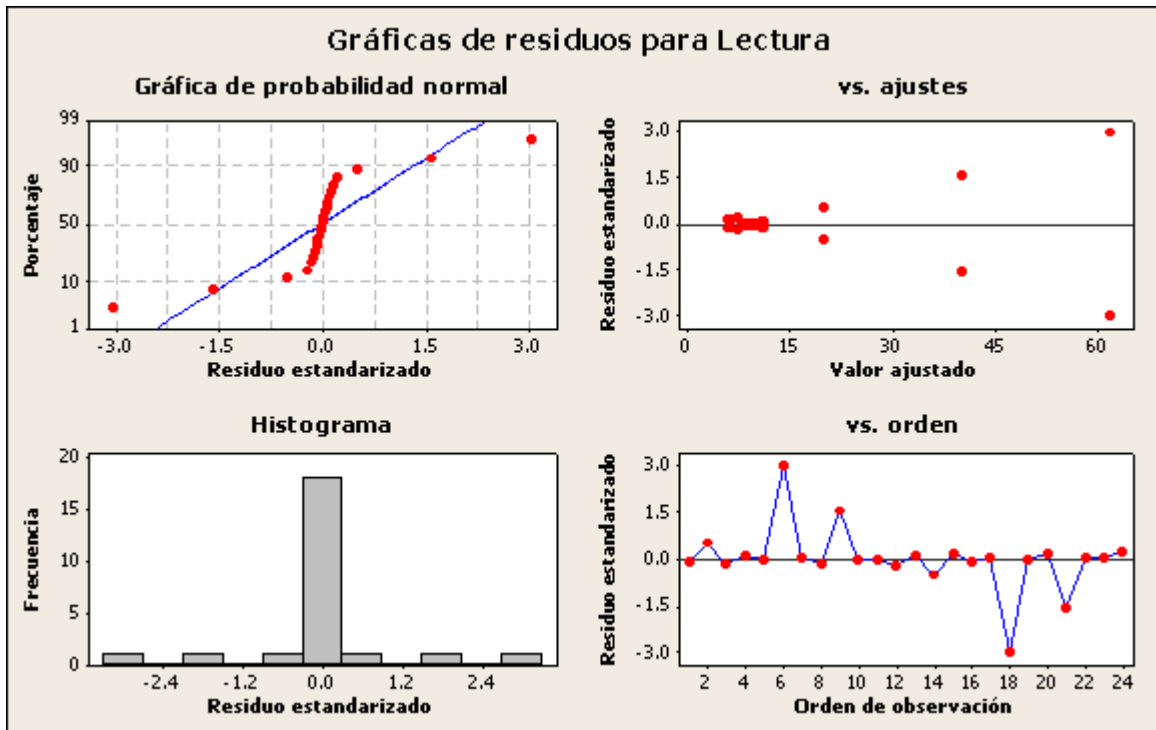


Figura 77. Gráfica de residuos para las lecturas obtenidas

De las gráficas anteriores se puede observar una tendencia creciente de la variación estándar del tiempo entre mensajes recibidos ante el incremento en la distancia y el número de muros que la señal debe atravesar para llegar al receptor.

El número de muros representa el factor más significativo debido a que aún a distancias cortas puede influir de manera decisiva en la pérdida de mensajes o el incremento de tiempo entre lecturas.

También puede verificarse con las mediciones efectuadas que el sistema ofrece una gran fiabilidad en la transmisión de información, pues aunque pudiese variar ligeramente el tiempo de recepción del mensaje, para la aplicación deseada de monitoreo del nivel de un tanque de gas estacionario tal variación es irrelevante.

Se pueden asimismo aprovechar las ventajas que ofrece el sistema propuesto para conectar módulos adicionales y así formar parte de una red doméstica de sensores que compartan información entre sí.

4.3. Resultados no anticipados

Se obtuvieron algunas lecturas inesperadas cuando se hicieron mediciones de recepción del sistema propuesto al interior de habitaciones con azulejos, pues a pesar de no estar físicamente a gran distancia del transmisor, hubo en algunos casos pérdida de lecturas.

Asimismo, se esperaba un efecto más marcado sobre la recepción de la señal al aumentar la distancia y el número de muros atravesados por la señal transmitida.

Sin embargo en prácticamente la totalidad de las lecturas se recibió el dato correspondiente y se tuvo un tiempo de procesamiento adecuado. Esto se podría explicar por las rutas alternas que la señal transmitida siguió y que ayudaron a mantener el nivel de la señal recibida rodeando los obstáculos en la construcción de la casa habitación.

V. CONCLUSIONES, IMPLICACIONES Y TRABAJO A FUTURO

5.1. Conclusiones basadas en el capítulo IV

Con base en los resultados obtenidos en el capítulo anterior, se puede observar que el uso de un sistema inalámbrico ZigBee para el monitoreo del nivel de un tanque de gas estacionario ofrece múltiples ventajas respecto a un sistema cableado:

- Flexibilidad para colocar el receptor / display en cualquier lugar de la casa habitación, en lugar de estar fijo en un solo lugar.
- Facilidad de instalación, pues el sistema final no requiere de complejas conexiones ni de cableados especiales.
- Posibilidad de integrarse como un nodo perteneciente a una red de sensores conectados a un sistema domótico central.
- Factibilidad de adquirir otras señales, monitorear otras variables (no sólo el nivel del tanque estacionario de gas), y transmitir todos los datos a la vez utilizando el mismo radiotransmisor ZigBee.
- Seguridad de la información, al utilizar el estándar ZigBee y sus características de comunicación entre sensores con números de serie específicos, su cifrado de información AES-128 bits, y la posibilidad de manejar protocolos propios en la trama de datos transmitida.
- Fiabilidad en la recepción de datos, ya que los experimentos comprobaron el alcance del sistema, recibiendo las tramas de datos correctamente en múltiples habitaciones dentro de la casa habitación.

- Interoperabilidad con otros sistemas ZigBee desarrollados por diversos fabricantes, utilizando perfiles definidos para aplicaciones domésticas.

5.2. Fortalezas y debilidades del estudio realizado

Entre las fortalezas del estudio realizado se encuentran el haber realizado pruebas de alcance de la señal transmitida en múltiples ubicaciones dentro de la casa habitación, así como el haber utilizado herramientas de *software* y de *hardware* para poder realizar análisis de las señales recibidas y asegurar que el sistema funcionará como se diseñó.

Entre las debilidades del estudio realizado se encuentra la nula disponibilidad de sistemas inalámbricos disponibles comercialmente para la medición del nivel de tanques de gas estacionario domésticos, lo que hubiera permitido realizar una comparación directa acerca del desempeño del sistema de transmisión utilizado, incluyendo mediciones sobre la vida útil de la batería del sistema, el consumo de corriente y la fiabilidad en la transmisión de la información.

5.3. Qué se puede realizar como trabajo futuro

Como actividades posteriores se proponen:

- Diseñar módulos adicionales de adquisición de datos domésticos que puedan integrarse al sistema central de recepción de datos desarrollado.
- Implementar un sistema de comunicaciones bidireccionales entre el sistema central de recepción con una PC, mediante un módulo Wi-Fi, con el propósito de habilitar un monitoreo/configuración remoto que pueda

aprovechar la infraestructura de red inalámbrica existente en muchos hogares.

- Diseñar un sistema basado en celdas solares y baterías recargables, con el cual la duración de la batería se extendería grandemente.
- Rediseñar el hardware con el fin de utilizar componentes con menor consumo de energía, como los microcontroladores de ultra bajo consumo de energía de nueva generación.
- Rediseñar el software con el fin de implementar modos de bajo consumo de energía y habilitar un esquema de transmisión de datos en periodos autoajustables dependientes de factores ambientales, estadísticas de consumo y variación entre lecturas.
- Integrar la funcionalidad de sensor de efecto Hall, microcontrolador, transmisor ZigBee y batería en una sola carátula encapsulada que pueda colocarse directamente sobre el tanque de gas, reemplazando las carátulas actuales.

REFERENCIAS

- [1] Snijders, F. (2005). Ambient intelligence technology: an overview. En Weber, W., Rabaey, J.M., Aarts, E. (Eds.) *Ambient Intelligence* (255-269). Berlin: Springer-Verlag

- [2] Tapia, D., Bajo, J., Sanchez, J. M. & Corchado and, J.M. (2008). An ambient intelligence based multi-agent architecture. En Maña, A., Lotz, V. (Eds.) *Developing Ambient Intelligence Part 1* (68-78). doi: 10.1007/978-2-287-78544-3_7

- [3] Osipov, M. (2008). Home Automation with ZigBee. *Computer Science*, 2008(5174), 263–270. doi: 10.1007/978-3-540-85500-2_26

- [4] Peng, J., He, H., Zhu, P., Liu, Y., Zhang, X. & Jin, Y. (2010). Zigbee-based new approach to smart home. *Journal of Shanghai University (English Ed.)*, 14(1), 12-16. doi: 10.1007/s11741-010-0103-2

- [5] Labiod, H., Afifi, H. & De Santis, C. (2007). *Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee and WiMax*. doi: 10.1007/978-1-4020-5397-9_4

- [6] Kim, H., Jarochoowski, B., & Ryu, D. (2006). A Proposal for a Home-Based Health Monitoring System for the Elderly or Disabled. *Computer Science*, 2006(4061), 473–479. doi: 10.1007/11788713_71

- [7] Buratti, C., Conti, A., Dardari, D. & Verdone, R. An Overview on Wireless Sensor Networks Technology and Evolution. *Sensors Journal*, 2009(9), 6869-6896. doi: 10.3390/s90906869

- [8] Gislason, D. (2008). Hello ZigBee. En Gislason, D. (Ed.) *ZigBee Wireless Networking* (1-44). Oxford: NewNes Elsevier

- [9] Pan, M. & Tseng, Y. (2007). ZigBee and Their Applications. En Mahalik, N. (Ed.) *Sensor Networks and Configuration* (349-368). Berlin: Springer-Verlag.

- [10] Cuomoa, F., Della Lunaa, S., Cipollonea, E., Todorovab, P. & Suihkoc, T. (2008). Topology formation in IEEE 802.15.4: cluster-tree characterization. *6th Annual IEEE Conference on Pervasive Computing and Communications*, 2008, 276-277. doi: 10.1109/PERCOM.2008.26
- [11] Nguyen, S. T. & Rong, C. (2007). ZigBee Security Using Identity-Based Cryptography. *Computer Science*, 2007(4610), 3-12. doi: 10.1007/978-3-540-73547-2_3
- [12] MideGas (2011). *Medidor de porcentaje MideGas P. Version 2.2*. México: Autor. Recuperado de <http://www.gas-lp.com/page7/page7.html>
- [13] Rochester Gauges Inc. (2009). *Hall Effect Twinsite TS012 for LP Gas Service*. Dallas: Autor. Recuperado de <http://www.rochestergauges.com/Pages/PDFs/TS012.pdf>
- [14] Rochester Gauges Inc. (2010). *DS-1318 Hall Effect Twinsites and R³D Hall Effect Module*. Dallas: Autor. Recuperado de http://www.rochestergauges.com/Pages/PDFs/DS_1318.pdf
- [15] Sun Hold Electric Inc.(2010). *MD Series Relay Datasheet*. Taiwán: Autor. Recuperado de <http://www.sunhold.com/upload/prd1/70-3.pdf>
- [16] National Semiconductor Corporation (2000). *COP8SA Family 8-Bit CMOS ROM Based and One-Time Programmable (OTP) Microcontroller with 1k to 4k Memory, Power On Reset, and Very Small Packaging*. (DS012838). Santa Clara: Autor. Recuperado de <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cop8saa5.pdf>
- [17] National Semiconductor Corporation (2001). *COP8SG Family 8-Bit CMOS ROM Based and OTP Microcontrollers with 8k to 32k Memory, Two Comparators and USART*. (DS101317). Santa Clara: Autor. Recuperado de <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cop8sgr5.pdf>
- [18] National Semiconductor Corporation (1995). *ADC0831/ADC0832/ADC0834 and ADC0838 8-Bit Serial I/O A/D Converters with Multiplexer Options*. (TL/H/5583). Santa Clara: Autor. Recuperado de <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/adc0831-n.pdf>

- [19] Digi International Inc. (2008). *XBee ZNet 2.5/XBee PRO Znet 2.5 OEM RF Modules- ZigBee*. (v1.x4x). Minnetonka: Autor. Recuperado de ftp://ftp1.digi.com/support/documentation/90000866_C.pdf
- [20] Digi International Inc. (2005). *XBee & XBee-PRO OEM RF Module Antenna Considerations*.(Application Note XST-AN019a). Minnetonka: Autor. Recuperado de http://ftp1.digi.com/support/images/XST-AN019a_XBeeAntennas.pdf
- [21] Montgomey, D. (2004). *Diseño y análisis de experimentos*. México: Limusa Wiley.
- [22] Cavagna Group (2010). *Cavagna LP Gas Valves and Equipment, 2010-2011 Catalog*. Italy: Autor. Recuperado de <http://www.cavagnagroup.com>
- [23] Maverick Industries Inc. (2011). *Digital Gas Watch Gauges Model GW-212E*. Edison: Autor. Recuperado de <http://www.maverickhousewares.com>
- [24] Rochester México (2002). *Indicador de lectura remota para tanques de almacenamiento de gas LP marca Elga modelo 3340-00001*. Mexico: Autor. Recuperado de <http://www.rochester-mexico.com>
- [25] Robertshaw Industrial Products (2011). *RSI 33521 Cellular Propane Monitor*. Maryville: Autor. Recuperado de <http://wirelessmonitoring.centeron.net>
- [26] Robertshaw Industrial Products (2009). *RSI 12333 Propane Gauge Monitor*. Maryville: Autor. Recuperado de <http://wirelessmonitoring.centeron.net>
- [27] Schwartz, S. M. (2011). Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) vs. Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) in Broadband Wireless Access (BWA) and Wireless LAN (WLAN). White Papers. 1-16. Recuperado de <http://sorin-schwartz.com/white.htm>
- [28] Robertshaw Industrial Products (2005). *Long Range Wireless LP Gas Tank Level Meter Model Number: RS-228*. Maryville: Autor. Recuperado de http://www.bakersgas.com/media/docs/manuals/manual_RS-228.pdf

- [29] Amazon.Com (2009). *Customer reviews at Amazon.com on Robertshaw Wireless Propane (LP) Gas Tank Level Meter RS-228*. Recuperado de http://www.amazon.com/Robertshaw-Wireless-Propane-Level-RS-228/product-reviews/B000IXILAK/ref=dp_top_cm_cr_acr_txt?ie=UTF8&showViewpoints=1
- [30] CGVMexico (2010). *Medidor de gas CuentaGas Digital*. Querétaro: Autor. Recuperado de http://www.cgvmexico.com/detalles_Medidor--de-gas-CUENTAGAS-digital-litro-x-litro--medidor-remoto-para-tanques-estacionarios-.7,32,22.htm
- [31] Eady, F. (2007). *Hands-On ZigBee. Implementing 802.15.4 with Microcontrollers*. Oxford: NewNes Elsevier
- [32] ZMD AG (2006). *ZMD44102 Data Sheet and User Manual (v.1.1)*. Dresden: Autor. Recuperado de http://www.semiconductorstore.com/pdf/newsite/zmd/ZMD44102SP_DS.pdf
- [33] Atmel Corporation (2009). *AT86RF230 Data Sheet*. (5131E-MCU Wireless-02/09). San Jose: Autor. Recuperado de <http://www.atmel.com/Images/doc5131.pdf>
- [34] Texas Instruments Inc. (2006). *CC2420 Data Sheet*. (SWRS041 v 1.4. 2006). Dallas: Autor. Recuperado de <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2420.pdf>
- [35] Freescale Semiconductor (2006). *MC13192/MC13193 Data Sheet*. (MC13192 Rev. 3.0). Chandler: Autor. Recuperado de <http://www.icbase.com/pdf/FRS/FRS01610603.pdf>
- [36] Freescale Semiconductor (2010). *MC13211/212/213 Data Sheet*. (MC1321xRM Rev. 1.6). Chandler: Autor. Recuperado de <http://images.ihcontent.net/vipimages/VipMasterIC/IC/FSCL/FSCLS05225/FSCLS05225-1.pdf>
- [37] Microchip Technology Inc. (2010). *MRF24J40 Data Sheet*. (DS39776C). Chandler: Autor. Recuperado de <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39776c.pdf>

- [38] Cirronet (2006). *ZN-241G 802.15.4 Radio Technical Reference*. (M-2400-0006 Rev A). Dulut:Autor. Recuperado de http://www.induowireless.com/manualer/modem/zn-241g_teknisk_referens.pdf
- [39] Panasonic (2005). *LR-WPAN Module PAN802154HAR00. Application Notes*. (PAN802154HAR00 rev A3). Osaka: Autor. Recuperado de http://www.panasonic.com/industrial/components/pdf/zigbee_appnote_0305.pdf
- [40] DLP Design Inc. (2007). *DLP-RF2-Z-G-G Data Sheet*. (Rev 1.9). Allen: Autor. Recuperado de <http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/DLP/rf2dsv19.pdf>
- [41] Microchip Technology Inc. (2011). *MRF24J40MC Data Sheet*. (DS75002A). Chandler: Autor. Recuperado de <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/75002A.pdf>
- [42] Telegesis UK Ltd. (2011). *ETRX35x ZigBee Modules Product Manual*. (TG-ETRX35X-PM-010-106). Bucks: Autor. Recuperado de <http://www.telegesis.com/downloads/general/TG-ETRX35x-PM-010-106.pdf>
- [43] Healy, M., Newe, T. & Lewis, E. (2008). Analysis of Hardware Encryption Versus Software Encryption on Wireless Sensor Network Motes. *Smart Sensors and Sensing Technology*, 20(1), 3-14. doi: 10.1007/978-3-540-79590-2_1
- [44] Tektronix Inc (2010). *Logic Analyzer Fundamentals. Primer*. (52W-14266-5). Beaverton: Autor. Recuperado de <http://www.afc-ingenieros.com/uploads/Afc/InfoTecn/AnalizLogicos/pdf/Logic%20Analyzer%20Fundamentals%2052W-14266-5%20-%20AFC.pdf>
- [45] Anzaar, A., Shahnawaz, H., Mukesh, C., Gupta, S.C., Gowri, R. & Mandoria, H.L. (2010). Simulation Study for Performance Comparison of Routing Protocols in Mobile Adhoc Network. *World Academy of Science, Engineering and Technology*,70(1), 684-686
- [46] Hitachi, Ltd. (1998). *HD44780U (LCD-II). Dot Matrix Liquid Crystal Display Controller/Driver*.(ADE-207-272(Z) '99.9 Rev. 0.0). Tokio: Autor. Recuperado de <http://www.sparkfun.com/datasheets/LCD/HD44780.pdf>

- [47] *Glossary of Electrical Engineering Terms*. Recuperado de <http://www.maxim-ic.com/glossary/>
- [48] National Semiconductor Corporation (1996). *Software for Interfacing the COP8 Family Microcontrollers to National's MICROWIRE EEPROMs*. (AN 841). Santa Clara: Autor. Recuperado de http://server.elektro.dtu.dk/ftp/database/Data_CDs/Component_data/National_COP8_1998/M_WIRE_P/AN-841.PDF
- [49] VTI Technologies (2005). *SPI Interface Specification*. (Technical Note 15) Vantaa: Autor. Recuperado de http://www.muratamems.fi/sites/default/files/documents/tn15_spi_interface_specification.pdf
- [50] Willig, A. (2006). Wireless sensor networks: concept, challenges and approaches. *Elektrotechnik & Informationstechnik*, 123(6), 224–231. doi: 10.1007/s00502-006-0351-1
- [51] Kuehl, R. O. (2001). *Diseño de experimentos*. México: Thomson Learning
- [52] Koubâa, A., Cunha, A. & Alves, M. (2007). A Time Division Beacon Scheduling Mechanism for IEEE 802.15.4/Zigbee Cluster-Tree Wireless Sensor Networks. *19th Euromicro Conference on Real-Time Systems (ECRTS'07)*, 1-11.
- [53] Pan, M., Fang, H., Liu, Y. & Tseng, Y. (2008). Address Assignment and Routing Schemes for ZigBee-Based Long-Thin Wireless Sensor Networks. *Vehicular Technology Conference Spring 2008*, 2008(1), 173–177.
- [54] CGVMexico (2010). *Medidor de gas CuentaGas De Procentaje*. Querétaro: Autor. Recuperado de http://www.cgvmexico.com/detalles_Medidor-de-gas-CUENTAGAS-de-porcentaje--medidor-remoto-para-tanques-estacionarios-.6,26,22.htm
- [55] Ikalogic (2012). *Scanalogic-2 Product Manual*. Limoges: Autor. Recuperado de http://www.ikalogic.com/wp-content/uploads/Scanalogic2_manual_EN.pdf

[56] Minitab Inc. (2010). *Meet Minitab 16*. (Versión 16.1.0) State College: Autor.
Recuperado de
http://www.minitab.com/uploadedFiles/Shared_Resources/Documents/MeetMinitab/ES16_MeetMinitab.pdf

APENDICE A

Conjunto de instrucciones de los microcontroladores COP8

A continuación se muestran los registros, símbolos y el conjunto de instrucciones utilizados en la familia de microcontroladores COP8SGx.

Cuadro A1. Registros en los microcontroladores COP8SGx [17]

REGISTROS	
A	Acumulador de 8 bits
B	Registro de direcciones de 8 bits
X	Registro de direcciones de 8 bits
SP	Registro de Apuntador de Stack de 8 bits
PC	Registro del Contador de Programa de 15 bits
PU	7 bits mas significativos del Contador de Programa
PL	8 bits menos significativos del Contador de Programa
C	Bit de Acarreo ubicado en el registro PSW
HC	Bit de Medio Acarreo ubicado en el registro PSW
GIE	Bit de Habilitación Global de Interrupciones ubicado en el registro PSW
VU	Byte más significativo del Vector de Interrupciones
VL	Byte menos significativo del Vector de Interrupciones

Cuadro A2. Símbolos empleados en el código de microcontroladores COP8SGx [17]

SÍMBOLOS	
[B]	Memoria Indirectamente Direccionada por el registro B
[X]	Memoria Indirectamente Direccionada por el registro X
MD	Memoria Directamente Direccionada
Mem	Memoria Directamente Direccionada ó [B]
MemI	Memoria Directamente Direccionada ó [B] ó Dato Inmediato
Imm	Dato Inmediato de 8 bits
Reg	Registro con direcciones F0 a FF (incluye B, X y SP)
Bit	Bit de Acarreo ubicado en el registro PSW
←	Cargado con
↔	Intercambiado con

Cuadro A3. Conjunto de instrucciones de microcontroladores COP8SGx [17]

ADD	A,Meml	ADD	$A \leftarrow A + Meml$
ADC	A,Meml	ADD with Carry	$A \leftarrow A + Meml + C$, $C \leftarrow Carry$, $HC \leftarrow Half\ Carry$
SUBC	A,Meml	Subtract with Carry	$A \leftarrow A - \overline{Meml} + C$, $C \leftarrow Carry$, $HC \leftarrow Half\ Carry$
AND	A,Meml	Logical AND	$A \leftarrow A \text{ and } \overline{Meml}$
ANDSZ	A,Imm	Logical AND Immed., Skip if Zero	Skip next if $(A \text{ and } Imm) = 0$
OR	A,Meml	Logical OR	$A \leftarrow A \text{ or } Meml$
XOR	A,Meml	Logical EXclusive OR	$A \leftarrow A \text{ xor } Meml$
IFEQ	MD,Imm	IF Equal	Compare MD and Imm, Do next if $MD = Imm$
IFEQ	A,Meml	IF Equal	Compare A and Meml, Do next if $A = Meml$
IFNE	A,Meml	IF Not Equal	Compare A and Meml, Do next if $A \neq Meml$
IFGT	A,Meml	IF Greater Than	Compare A and Meml, Do next if $A > Meml$
IFBNE	#	If B Not Equal	Do next if lower 4 bits of $B \neq Imm$
DRSZ	Reg	Decrement Reg., Skip if Zero	$Reg \leftarrow Reg - 1$, Skip if $Reg = 0$
SBIT	#,Mem	Set BIT	1 to bit, Mem (bit = 0 to 7 immediate)
RBIT	#,Mem	Reset BIT	0 to bit, Mem
IFBIT	#,Mem	IF BIT	If bit #, A or Mem is true do next instruction
RPND		Reset PeNDing Flag	Reset Software Interrupt Pending Flag
X	A,Mem	EXchange A with Memory	$A \leftrightarrow Mem$
X	A,[X]	EXchange A with Memory [X]	$A \leftrightarrow [X]$
LD	A,Meml	LoaD A with Memory	$A \leftarrow Meml$
LD	A,[X]	LoaD A with Memory [X]	$A \leftarrow [X]$
LD	B,Imm	LoaD B with Immed.	$B \leftarrow Imm$
LD	Mem,Imm	LoaD Memory Immed.	$Mem \leftarrow Imm$
LD	Reg,Imm	LoaD Register Memory Immed.	$Reg \leftarrow Imm$
X	A, [B ±]	EXchange A with Memory [B]	$A \leftrightarrow [B]$, $(B \leftarrow B \pm 1)$
X	A, [X ±]	EXchange A with Memory [X]	$A \leftrightarrow [X]$, $(X \leftarrow X \pm 1)$
LD	A, [B±]	LoaD A with Memory [B]	$A \leftarrow [B]$, $(B \leftarrow B \pm 1)$
LD	A, [X±]	LoaD A with Memory [X]	$A \leftarrow [X]$, $(X \leftarrow X \pm 1)$
LD	[B±],Imm	LoaD Memory [B] Immed.	$[B] \leftarrow Imm$, $(B \leftarrow B \pm 1)$
CLR	A	CLear A	$A \leftarrow 0$
INC	A	INCrement A	$A \leftarrow A + 1$
DEC	A	DECrement A	$A \leftarrow A - 1$
LAID		Load A INDirect from ROM	$A \leftarrow ROM(PU,A)$
DCOR	A	Decimal CORrect A	$A \leftarrow BCD\ correction\ of\ A\ (follows\ ADC,\ SUBC)$
RRC	A	Rotate A Right thru C	$C \rightarrow A7 \rightarrow \dots \rightarrow A0 \rightarrow C$
RLC	A	Rotate A Left thru C	$C \leftarrow A7 \leftarrow \dots \leftarrow A0 \leftarrow C$, $HC \leftarrow A0$
SWAP	A	SWAP nibbles of A	$A7 \dots A4 \leftrightarrow A3 \dots A0$
SC		Set C	$C \leftarrow 1$, $HC \leftarrow 1$
RC		Reset C	$C \leftarrow 0$, $HC \leftarrow 0$
IFC		IF C	If C is true, do next instruction
IFNC		IF Not C	If C is not true, do next instruction
POP	A	POP the stack into A	$SP \leftarrow SP + 1$, $A \leftarrow [SP]$
PUSH	A	PUSH A onto the stack	$[SP] \leftarrow A$, $SP \leftarrow SP - 1$
VIS		Vector to Interrupt Service Routine	$PU \leftarrow [VU]$, $PL \leftarrow [VL]$
JMPL	Addr.	Jump absolute Long	$PC \leftarrow ii$ ($ii = 15\ bits, 0\ to\ 32k$)
JMP	Addr.	Jump absolute	$PC9 \dots 0 \leftarrow i$ ($i = 12\ bits$)
JP	Disp.	Jump relative short	$PC \leftarrow PC + r$ (r is -31 to $+32$, except 1)
JSRL	Addr.	Jump SubRoutine Long	$[SP] \leftarrow PL$, $[SP-1] \leftarrow PU$, $SP-2$, $PC \leftarrow ii$
JSR	Addr.	Jump SubRoutine	$[SP] \leftarrow PL$, $[SP-1] \leftarrow PU$, $SP-2$, $PC9 \dots 0 \leftarrow i$
JID		Jump INDirect	$PL \leftarrow ROM(PU,A)$
RET		RETurn from subroutine	$SP + 2$, $PL \leftarrow [SP]$, $PU \leftarrow [SP-1]$
RETSK		RETurn and SKip	$SP + 2$, $PL \leftarrow [SP]$, $PU \leftarrow [SP-1]$, skip next instruction
RETI		RETurn from Interrupt	$SP + 2$, $PL \leftarrow [SP]$, $PU \leftarrow [SP-1]$, $GIE \leftarrow 1$
INTR		Generate an Interrupt	$[SP] \leftarrow PL$, $[SP-1] \leftarrow PU$, $SP-2$, $PC \leftarrow 0FF$
NOP		No OPeration	$PC \leftarrow PC + 1$

APENDICE B

Transceivers con stack IEEE 802.15.4 y ZigBee

El ZMD44102 (ZMD) es un transceiver de IEEE 802.15.4 que emplea la tecnología DSSS. Opera en la banda de 868 MHz a 20 kbps y en la banda de 915 MHz a 40 kbps. Su diagrama a bloques se muestra en la Figura B1. [31]

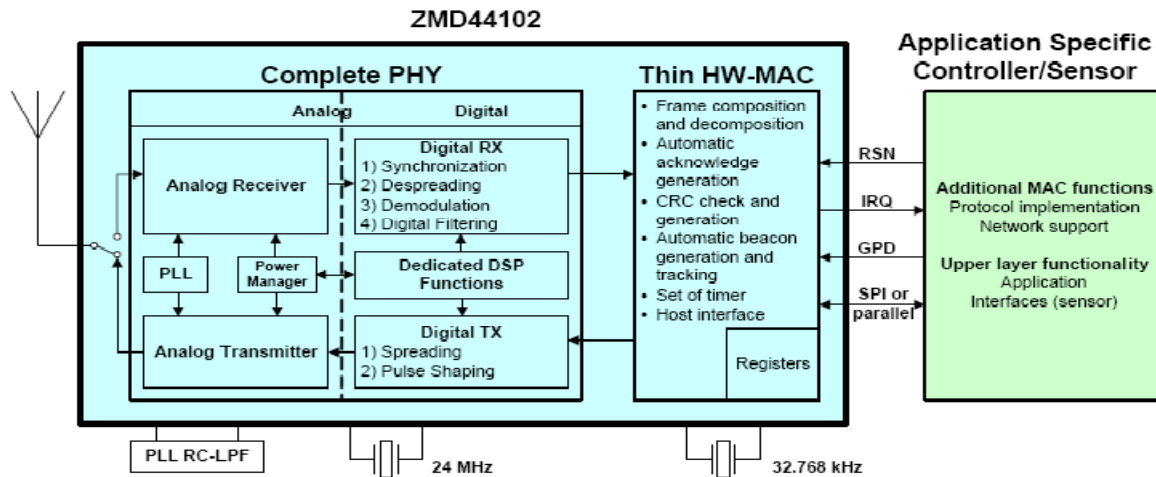


Figura B1. Diagrama a bloques del transceiver ZMD ZMD44102 [32]

El ZMD44102 opera a 3.3 V y consume 29 mA en modo normal, 1.3 uA en standby. Su alcance es hasta 100m a línea de vista. Tiene interfaces paralela y SPI. Las Figuras B2 y B3 muestran el pinout y circuito de aplicación típica. [32]

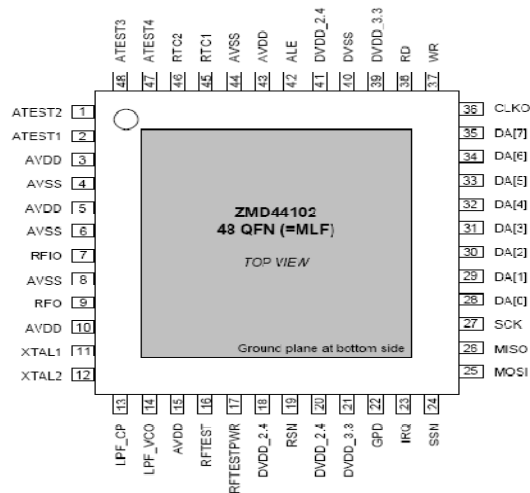


Figura B2. Pinout del transceiver ZMD ZMD44102 [32]

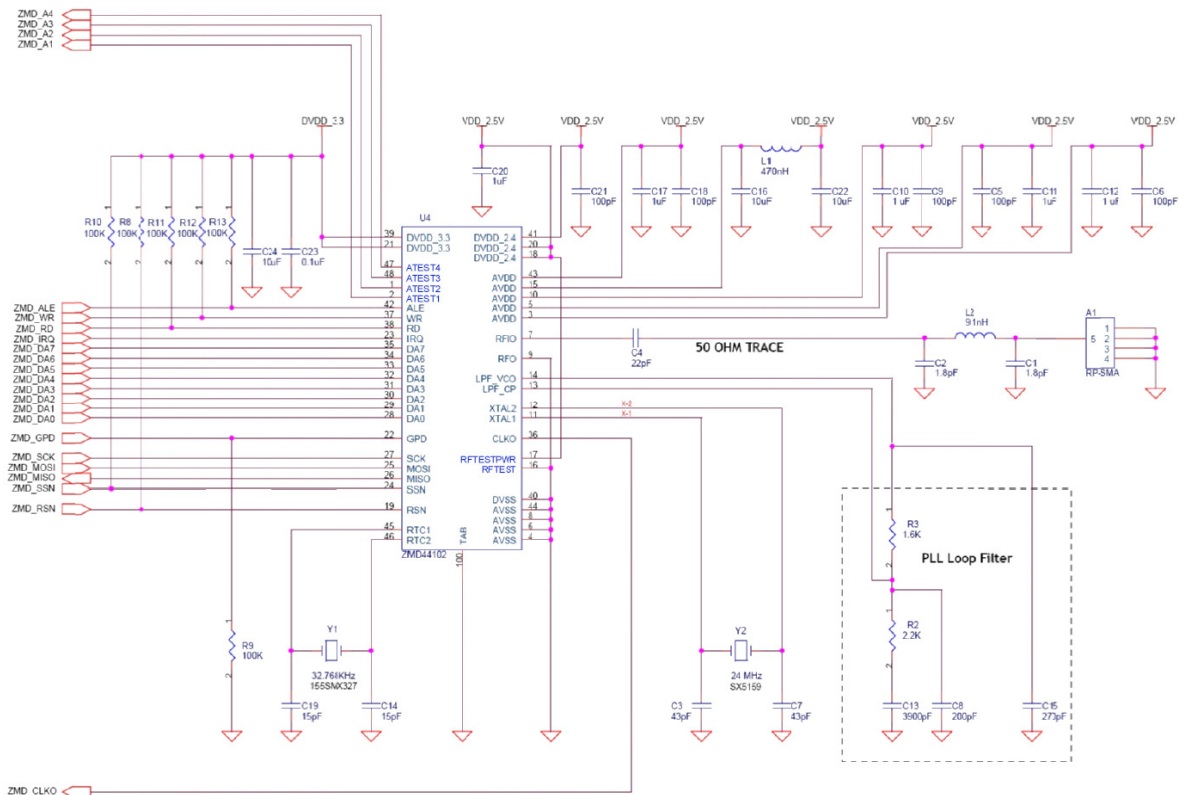


Figura B3. Circuito de aplicación típico del transceiver ZMD ZMD44102 [32]

El AT86RF230 (Atmel) es un transceiver de IEEE 802.15.4 que utiliza tecnología de transmisión O-QPSK a 2.4 GHz. Su diagrama a bloques se muestra en la Figura B4. [31]

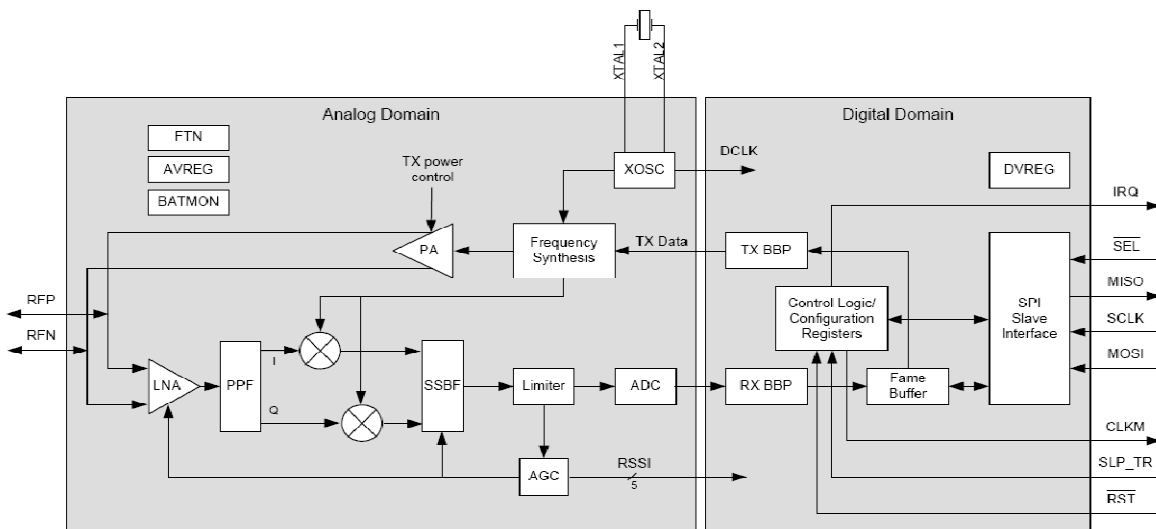


Figura B4. Diagrama a bloques del transceiver Atmel AT86RF230 [33]

El AT86RF230 opera entre 1.8 y 3.6 V. Consume 16 mA en modo normal, 20 nA en modo sleep. Se produce en un empaque QLP de 32 pines. Tiene interface SPI. El pinout y el circuito de aplicación se muestran en la Figuras B5 y B6. [33]

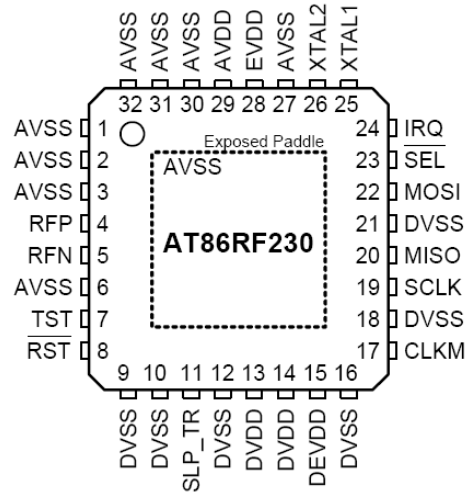


Figura B5. Pinout del transceiver Atmel AT86RF230 [33]

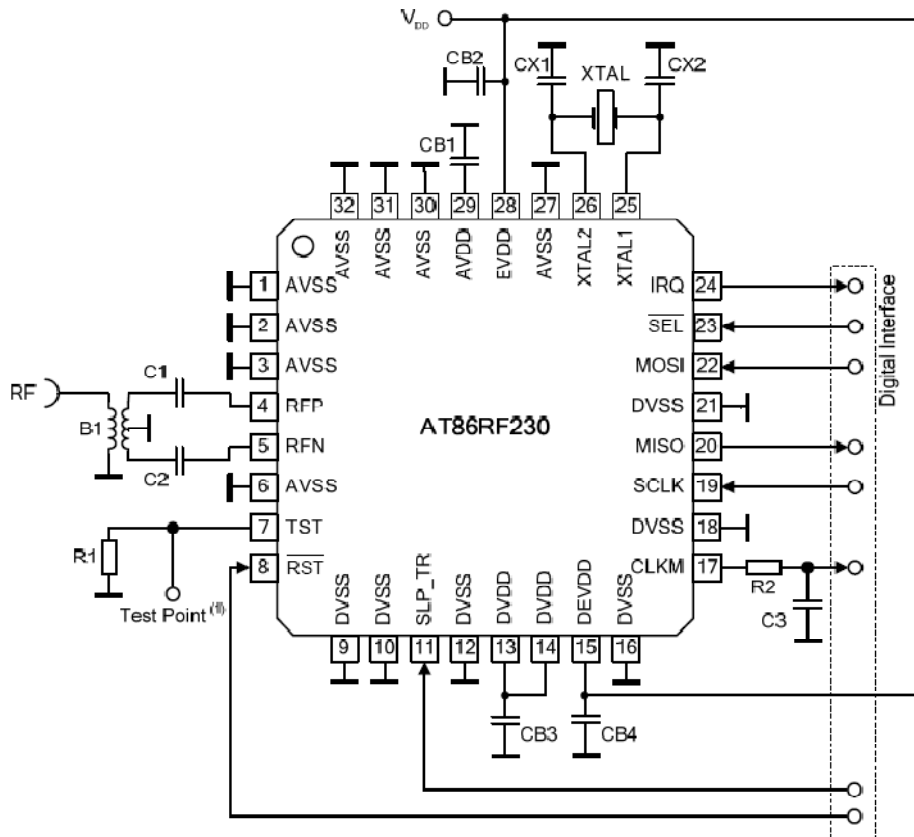


Figura B6. Circuito de aplicación típico del transceiver Atmel AT86RF230 [33]

El CC2420 (Texas Instruments / Chipcon) es un transceiver de IEEE 802.15.4 que usa tecnología DSSS. Opera a 2.4 GHz transmitiendo a 250 kbps. Su diagrama a bloques se muestra en la Figura B7. [34]

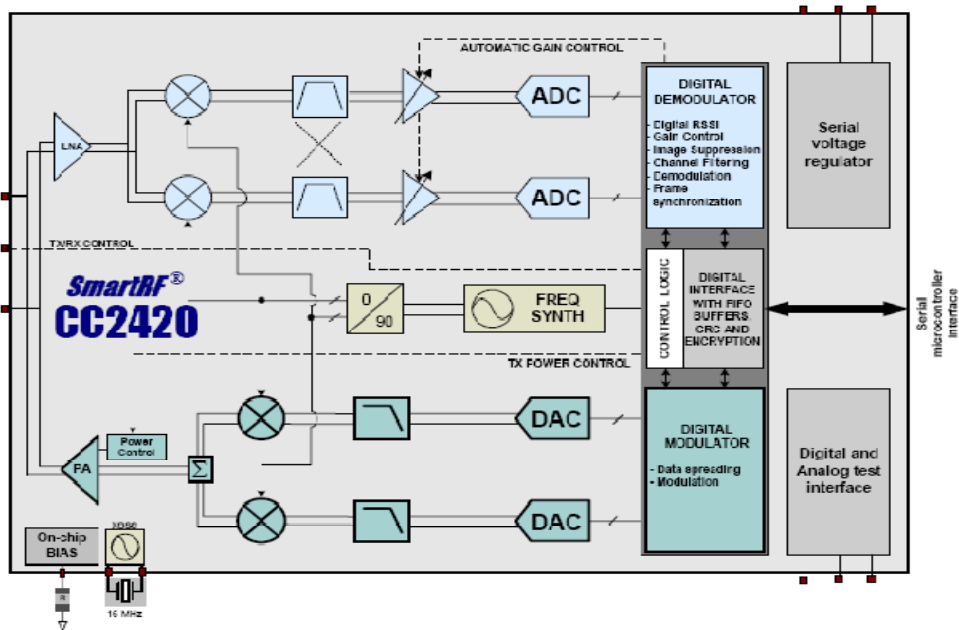


Figura B7. Diagrama a bloques del transceiver TI/Chipcon CC2420 [34]

El CC2420 opera entre 2.1 y 3.6 V. Consume 19 mA en modo normal, 400 uA en modo idle. Se produce en empaque QLP de 48 pines. Tiene interface SPI. El pinout y el circuito de aplicación típico se muestran en las Figuras B8 y B9. [34]

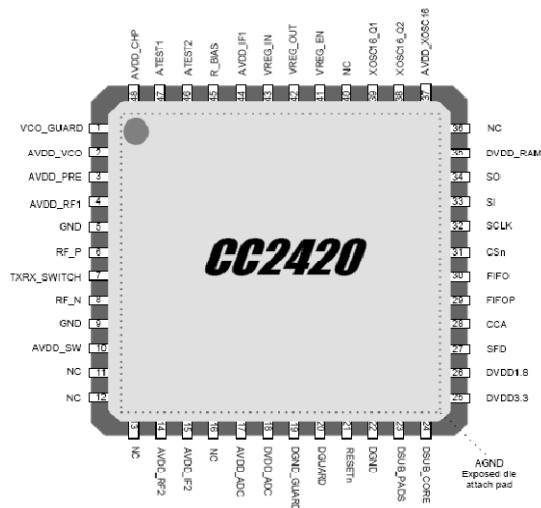


Figura B8. Pinout del transceiver TI/Chipcon CC2420 [34]

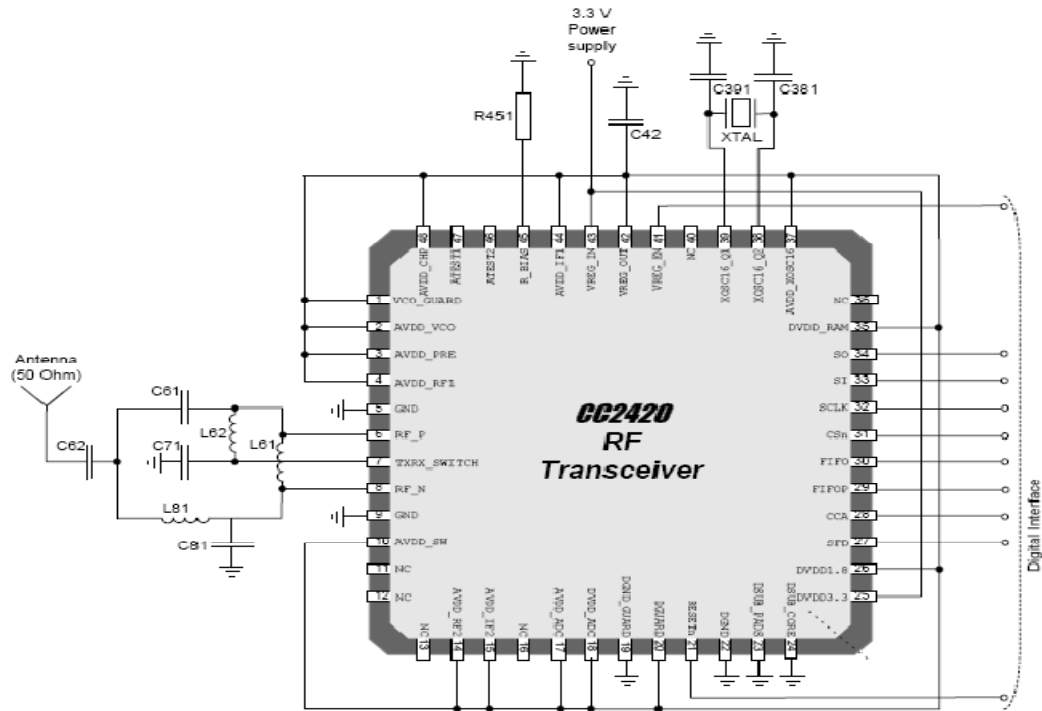


Figura B9. Circuito de aplicación típico del transceiver TI/Chipcon CC2420 [34]

El transceiver Freescale MC13193 contiene stacks de IEEE 802.15.4 PY/MAC y ZigBee para utilizarse con los microcontroladores HCS08. Opera en la banda de 2.4 GHz y utiliza tecnología O-QSPK a 250 kbps. Su diagrama a bloques se muestra en la Figura B10. [35]

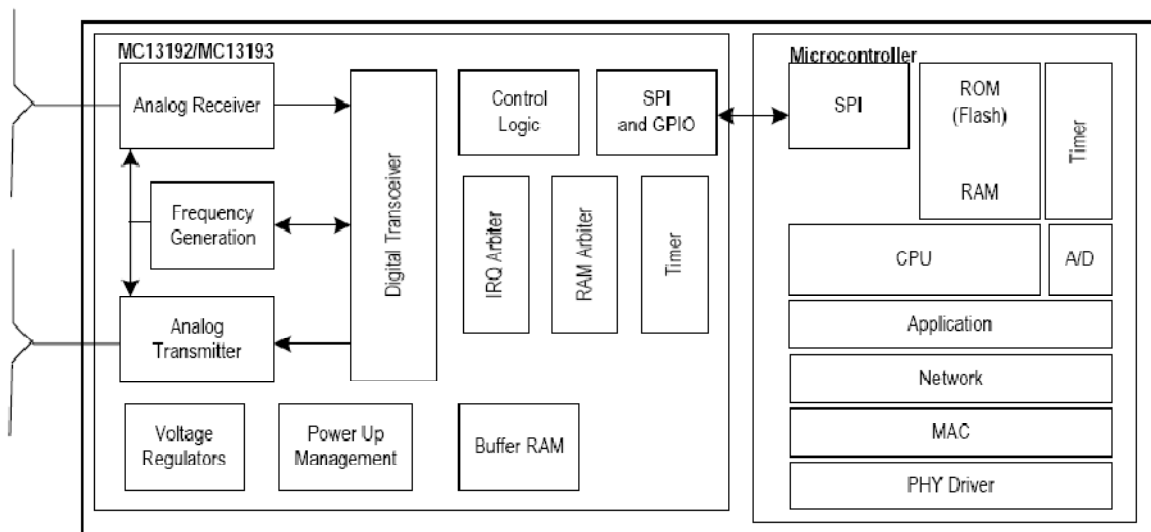


Figura B10. Diagrama a bloques del transceiver Freescale MC13193 [35]

El MC13193 opera en un rango de 2.0 V a 3.4 V. Consume 42mA en modo normal, 1uA en modo Off. Se ofrece en empaque QFN-32. Incorpora una interface SPI de 4 líneas. Las Figuras B11 y B12 muestran el pinout y el circuito de aplicación típico. [35]

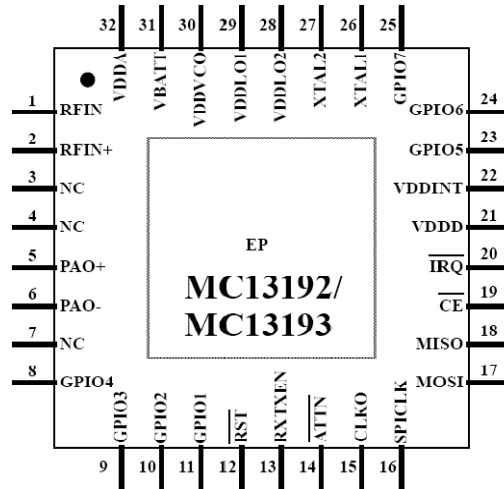


Figura B11. Pinout del transceiver Freescale MC13193 [35]

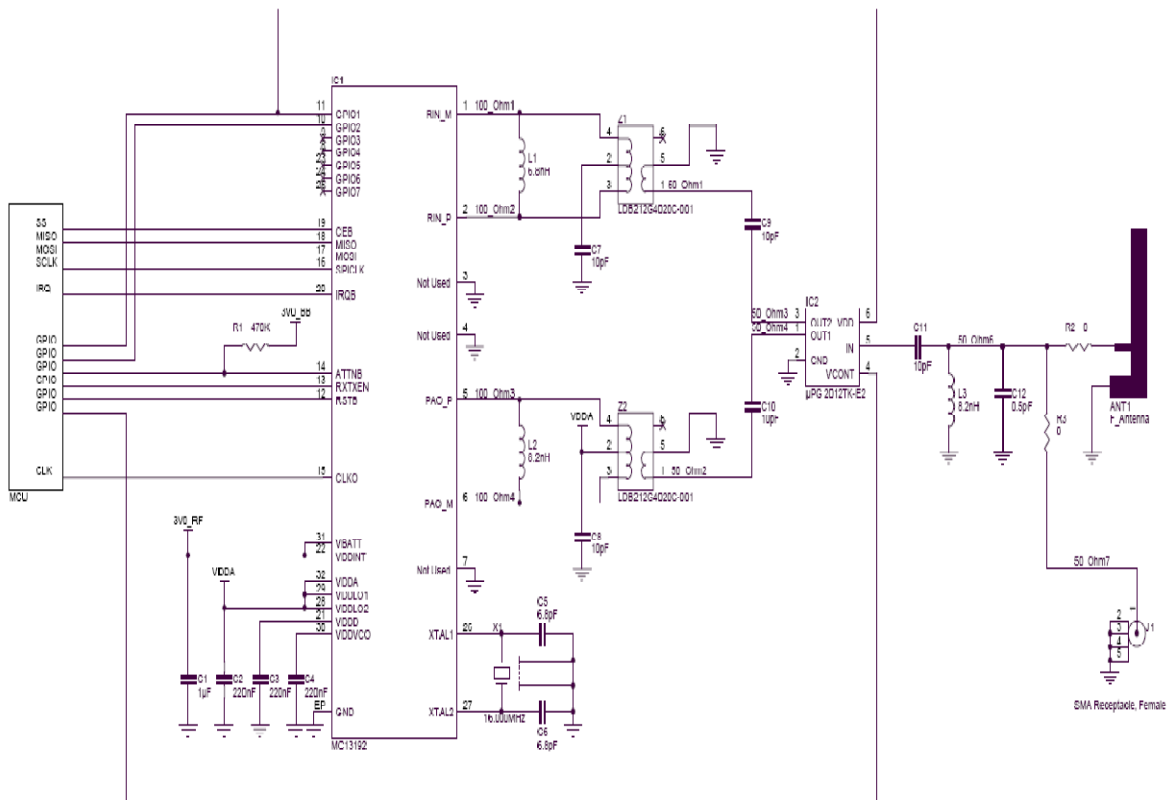


Figura B12. Circuito de aplicación típico del transceiver Freescale MC13193 [35]

El transceiver Freescale MC13213 es parte de la segunda generación de la plataforma ZigBee de Freescale. Contiene stacks de IEEE 802.15.4 PHY/MAC y BeeStack ZigBee. Opera en la banda de 2.4 GHz y utiliza tecnología O-QSPK a 250 kbps. Integra un CPU HCS08-40MHz con 60KB Flash, 4KB RAM conectado mediante SPI dedicado hacia el transceiver de radiofrecuencia. Su diagrama a bloques se muestra en la Figura B13. [36]

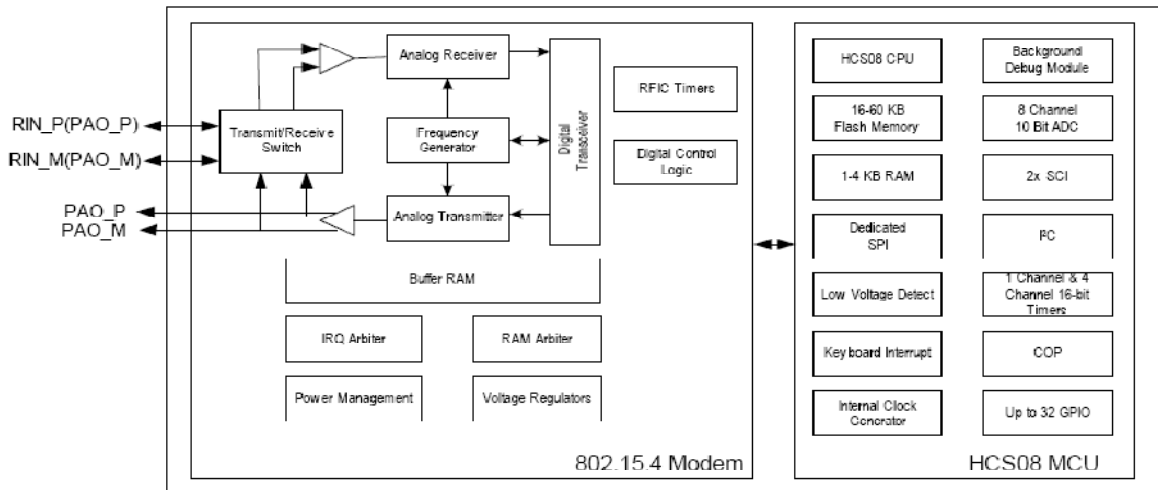


Figura B13. Diagrama a bloques del transceiver Freescale MC13213 [36]

El MC13213 opera en un rango de 2.0 V a 3.4 V. Consume 42mA en modo normal, 1uA en modo Off. Se ofrece en empaque LGA de 71 pines, mostrado en la Figura B14. [35]

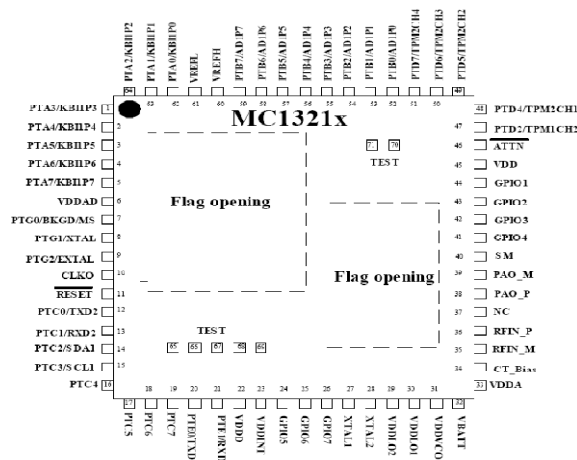


Figura B14. Pinout del transceiver Freescale MC13213 [36]

El transceiver Microchip MRF24J40 soporta IEEE 802.15.4, ZigBee y MiWi. Opera en la banda de 2.4 GHz a 250/625 kbps. Incorpora encriptación AES 128-bits. Su diagrama a bloques se muestra en la Figura B15. [31], [37]

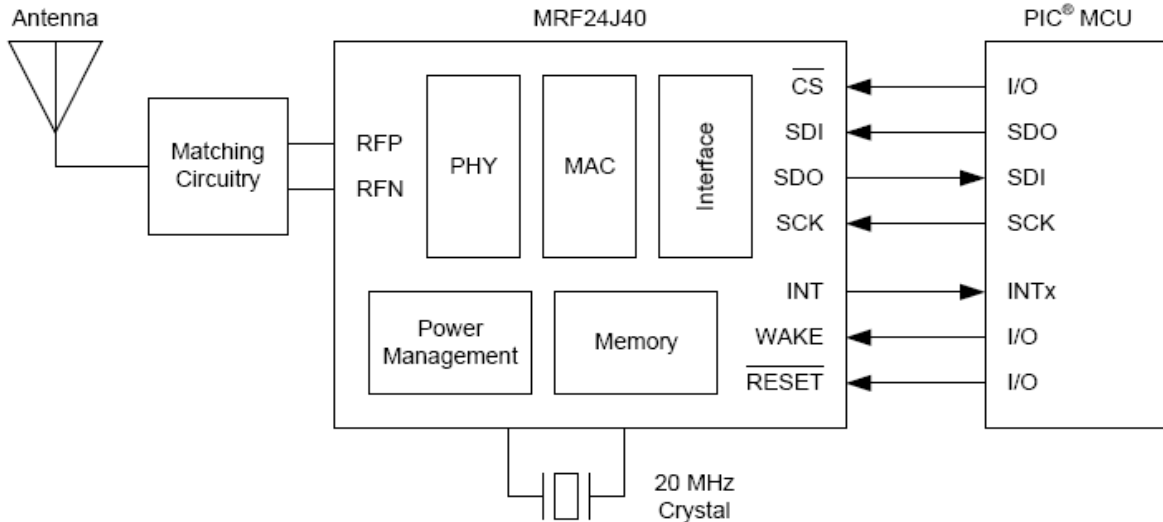


Figura B15. Diagrama a bloques del transceiver Microchip MRF24J40 [37]

El MRF24J40 opera entre 2.4 y 3.6 V. Consume 23mA en modo normal, 2uA en modo sleep. Se produce en empaque QFN-40. Incorpora una interface SPI de 4 líneas. Las Figuras B16 y B17 muestran el pinout y el circuito de aplicación típico. [37]

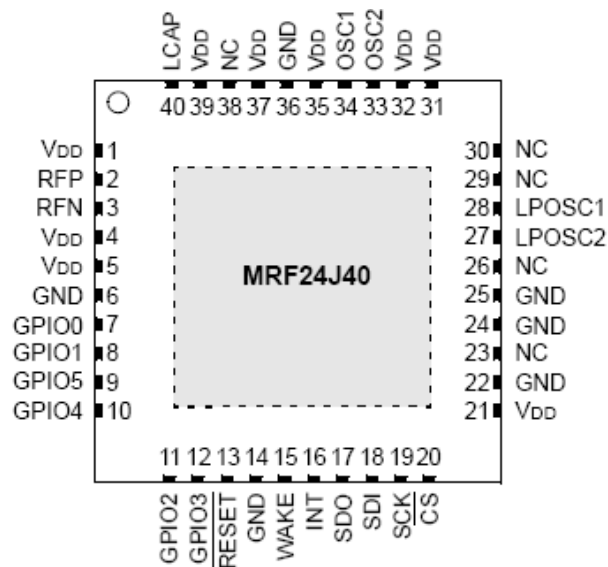


Figura B16. Pinout del transceiver Microchip MR24J40 [37]

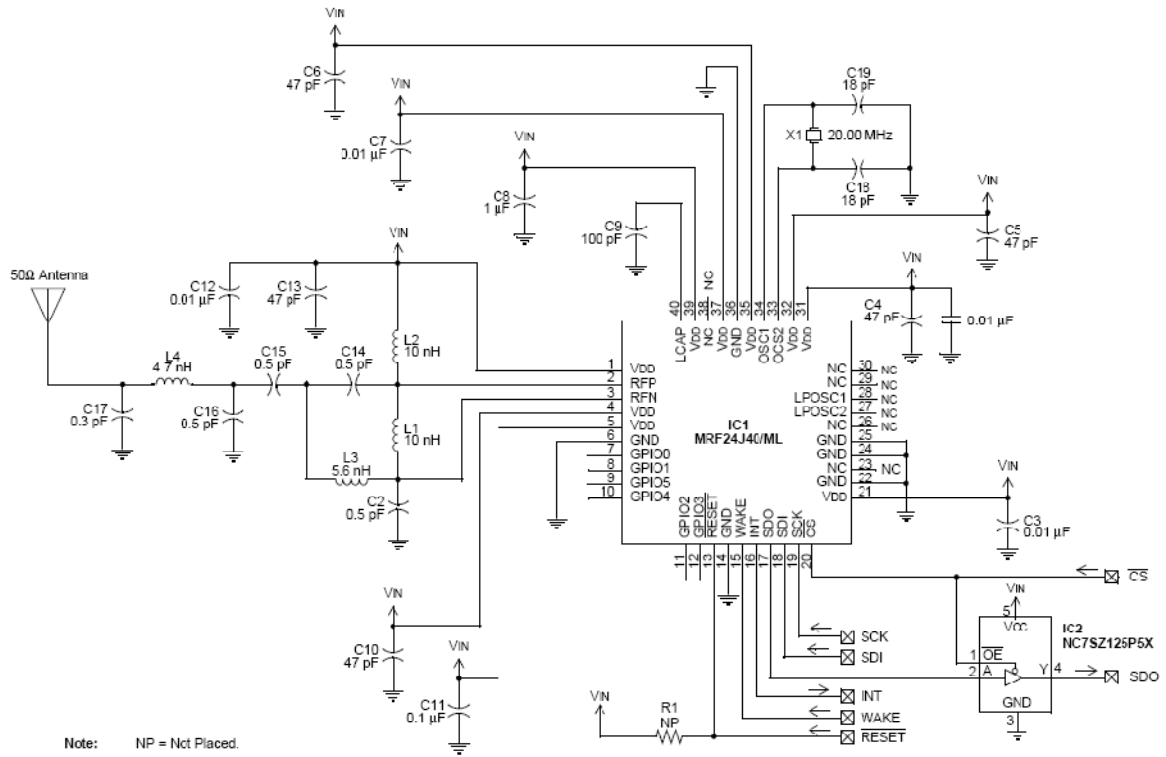


Figura B17. Circuito de aplicación típico del transceiver Microchip MR24J40 [37]

APENDICE C

Módulos IEEE 802.15.4 / ZigBee comercialmente disponibles

Diversos fabricantes conjuntan *transceivers* de IEEE 802.15.4, stacks ZigBee y etapas de acoplamiento y potencia, ofreciendo módulos que pueden integrarse a diseños propios.

MaxStream (Digi) ofrece los módulos XBEE y XBEE-Pro para IEEE 802.15.4 y ZigBee. Se constituyen de un microcontrolador Freescale MC9S08GT60 y un *transceiver* Freescale MC13193. Su diagrama a bloques se muestra en la Figura C1. [31]

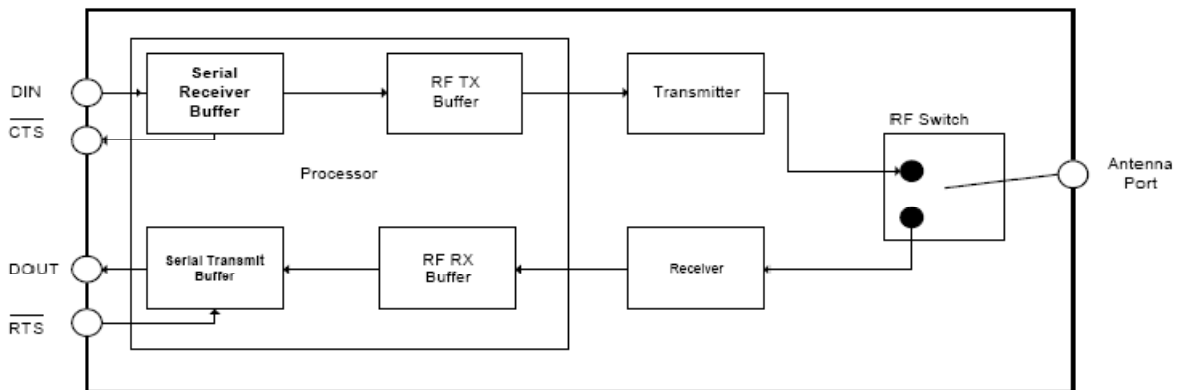


Figura C1. Diagrama a bloques del módulo MaxStream XBEE / BEE-Pro [31]

Los módulos XBEE / XBEE-Pro operan entre 2.8 y 3.4 V. Su consumo de corriente varía entre 45 y 300 mA en modo normal y 10uA en modo power down. Tiene interface UART. El pinout y el circuito de aplicación se muestran en la Figuras C2 y C3. [19]

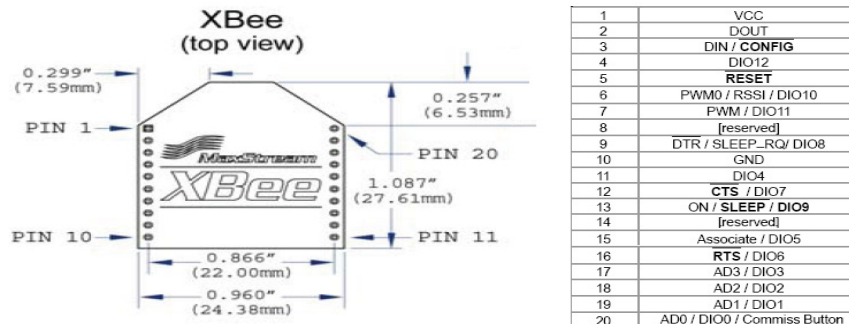


Figura C2. Pinout de los módulos MaxStream XBEE / XBEE-Pro [19]

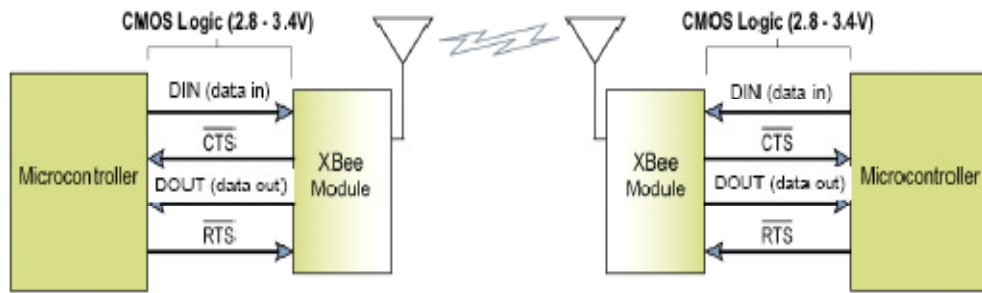


Figura C3. Diagrama de aplicación módulos MaxStream XBEE / XBEE-Pro [19]

Los módulos Cirronet ZN241Z IEEE 802.15.4 se constituyen del módulo Cirronet ZMN2400HP (integrado por un microcontrolador ATMEGA128L y un transceiver TI/Chipcon CC2420) y circuitería adicional. Operan en la banda de 2.4 GHz a 250 kpbs. Tienen interface RS232 o USB. Su voltaje de operación está entre 5.5 y 6 V. Su consumo de corriente varía entre 70 y 180 mA. Se muestra en la Figura C4. [31], [38]



Figura C4. Módulo Cirronet ZN241Z IEEE 802.15.4 [38]

Silicon Laboratories ofrece tarjetas de desarrollo IEEE 802.15.4 que operan a 2.4 GHz y están basadas en el microcontrolador Silicon Laboratories C8051F121 y en el transceiver TI/Chipcon CC2420. Implementan un stack de red llamado Silicon Laboratories ZigBee Network Layer Interface. La Figura C5 muestra dicha tarjeta de desarrollo. [31]

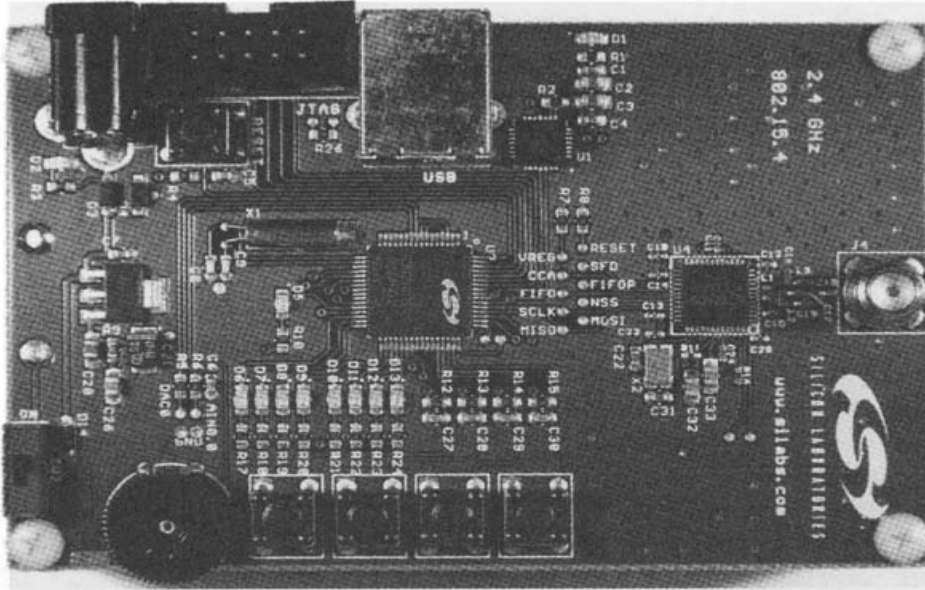


Figura C5. Tarjeta de desarrollo Silicon Labs 2.4 GHz 802.15.4 [31]

Renesas ofrece tarjetas de desarrollo ZigBee basadas en el microcontrolador M30280FA de 16 bits y el transceiver TI/Chipcon CC240. Implementa el Renesas ZigBee Stack. Hay versiones para la banda de 900 MHz y para la de 2.4 GHz. La tarjeta de desarrollo se muestra en la Figura C6. [31]

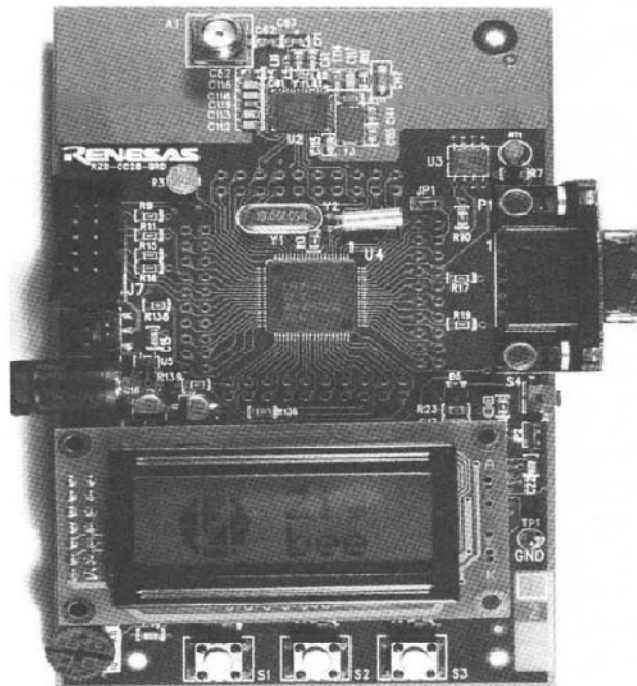


Figura C6. Tarjeta de desarrollo ZigBee Renesas-M30280FA [31]

Los módulos Panasonic PAN802154HAR00 de IEEE 802.15.4/ZigBee se componen de un microcontrolador Freescale MC9S08GT60CFB y un transceiver MC13193. Operan a 2.4 GHz, 250 kbps. Operan de 2.0 a 3.4 V. Tiene una interface RS232. Consume 35 mA en modo normal, y 5uA en modo stop. Su esquemático se muestra en la Figura C7. [31], [39]

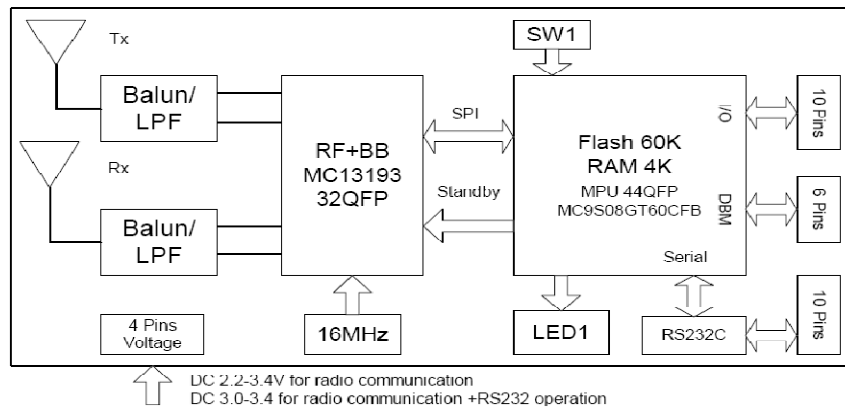


Figura C7. Diagrama a bloques del módulo Panasonic PAN802154HAR00 [39]

DLP Design ofrece el módulo DLP-RF2-Z-G-G para IEEE 802.15.4/ZigBee basado en el transceiver MC13193 y el microcontrolador MC9S08GT60. Opera a 2.4 GHz, 250 kbps. Tiene una interface de 20 pines (I/Os), y otra interface serial de 3 líneas para controlar el módulo. Opera a 3V. Su esquemático se muestra en la Figura C8. [31], [40]

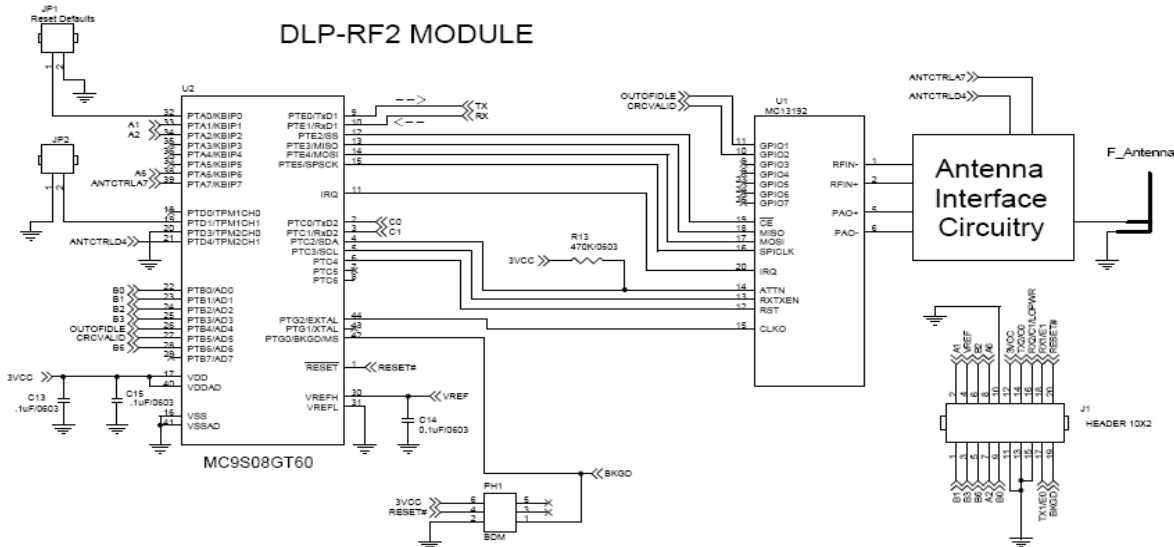


Figura C8. Diagrama a bloques del módulo DLP Design DLP-RF2-Z-G-G [40]

Microchip ofrece el módulo MRF24J40MC basado en el transceiver MRF24J40. Incorpora etapas de acoplamiento y potencia. Transmite a 2.4 GHz, 250 kbps. Tiene una interface SPI de 4 líneas. Opera entre 2.7 y 3.6 V. Consume 120 mA en modo normal y 12uA en modo sleep. Su esquemático y pinout se muestran en las Figuras C9 y C10. [31], [41]

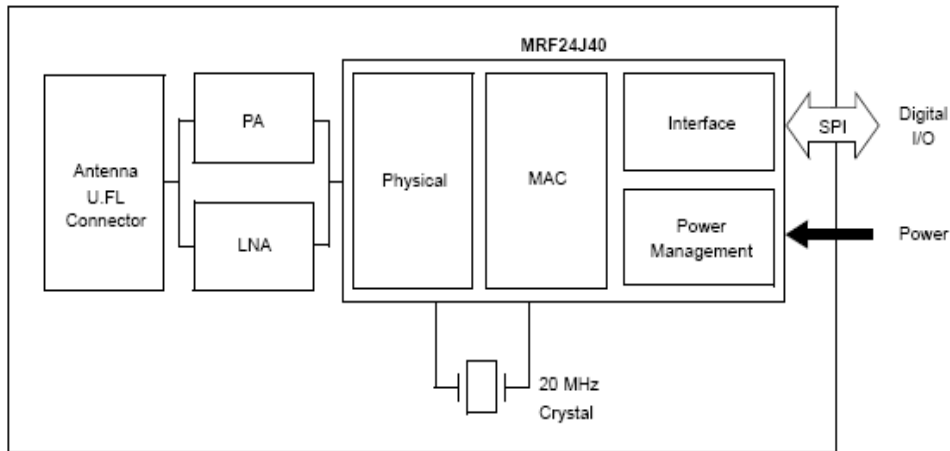


Figura C9. Diagrama a bloques del módulo Microchip MRF24J40MC [41]

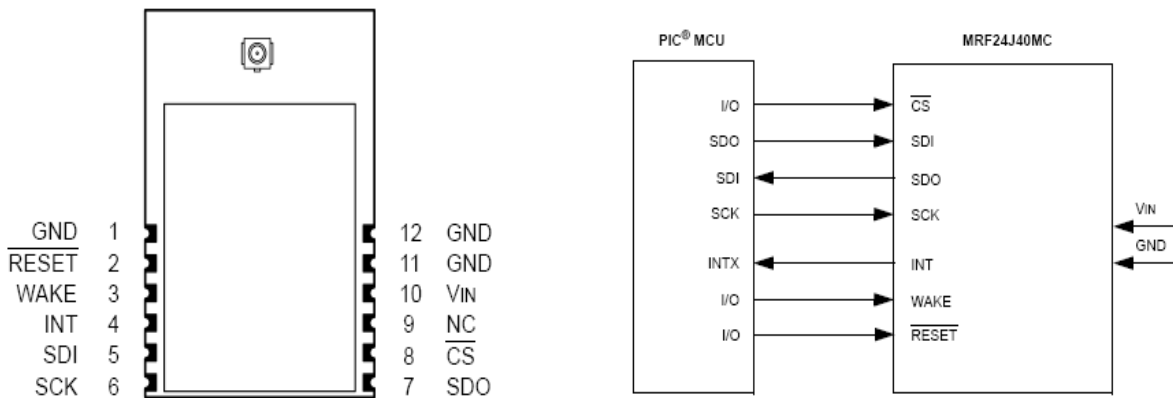


Figura C10. Pinout y conexión del módulo Microchip MRF24J40MC [41]

Telegesis ofrece el módulo ETRX357 basado en el chip Ember EM357, que implementa el stack EmberZNet ZigBee. Integra un CPU ARM Cortex-M3 de 32 bits, con 24 IOs, 192KB flash y 12KB RAM. Opera a 2.4 GHz, 250 kbps. Se alimenta entre 2.1 y 3.6 V. Consume 42 mA en modo normal y menos de 1uA en modo sleep. Incorpora encriptación AES 128-bits. La Figura C11 muestra el pinout y diagrama de conexiones del módulo ETRX357. [42]

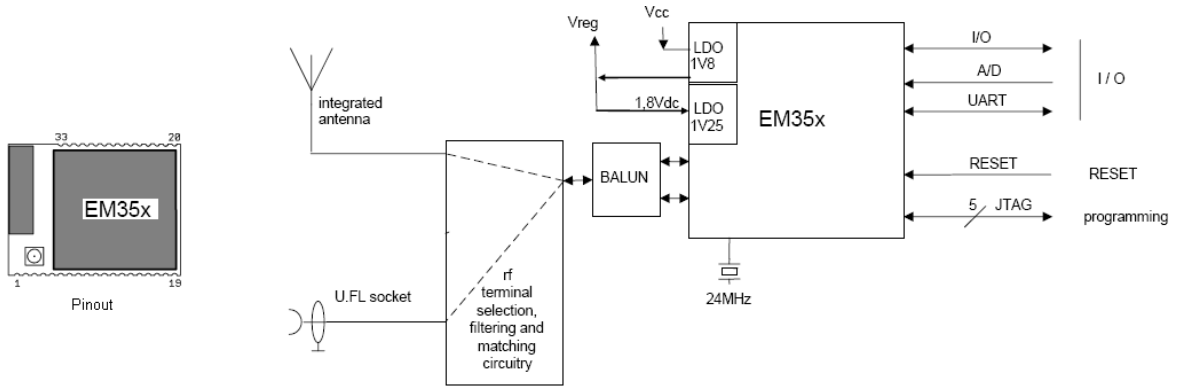


Figura C11. Pinout y conexión del módulo Telegesis ETRX357 [42]