

**INSTITUTO TECNOLOGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRONICA**



**Diseño e implementación de una red de comunicación inalámbrica para
protección ambiental en el bosque**

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en
Electrónica con el grado académico de Licenciatura**

Emmanuel Navarro Murillo

Cartago, Julio de 2005


INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRONICA

PROYECTO DE GRADUACIÓN

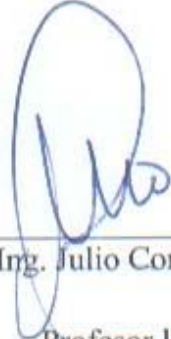
TRIBUNAL EVALUADOR

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

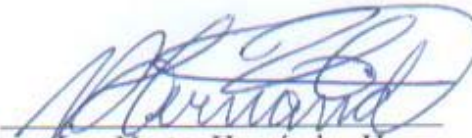
Miembros del Tribunal



Ing. Faustino Montes de Oca M.
Profesor lector



Ing. Julio Cordoba A.
Profesor lector



Ing. Nestor Hernández H.
Profesor asesor



Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica


Cartago, 4 de Agosto, 2005

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, 26 de Julio del 2005


Emmanuel Navarro Murillo
2 – 564 – 807

Resumen

En la actualidad se da gran importancia a la conservación de los recursos naturales del nuestro país y del planeta en general. En nuestro país los bosques se ven amenazados por varias prácticas ilegales como la caza, tala de árboles e incendios. Por esta razón nace la idea de utilizar los conocimientos de electrónica para crear un sistema de detección de estas actividades. La meta del presente proyecto es desarrollar una herramienta de monitoreo de zonas boscosas que permita la detección remota de actividades que dañen la integridad de la flora y fauna, permitiendo a las autoridades actuar de forma rápida y eficaz en procura de la protección de los recursos naturales de estas áreas

Las áreas naturales se han convertido en una de las principales riquezas de nuestro país, pues son una verdadera atracción para los turistas del resto del mundo, además que brinda un medio ambiente sano para la población nacional. Aquí radica la importancia de este proyecto, pues mediante la conservación de estos recursos se asegura la salud y una fuente de ingresos para las futuras generaciones.

El presente proyecto se enfoca en brindar una solución para la red comunicación inalámbrica del sistema de monitoreo, diseñando la parte física y los protocolos de la misma. El protocolo planteado concibe la red como una serie de niveles lógicos, los cuales tendrán a la base en el cero y se irá en aumento conforme se aleje de la misma a razón del rango de alcance de los teledetectores creados. Cuando se presente un evento, la información recopilada del mismo seguirá un camino descendente a través de los niveles. La ruta que sigan los datos hasta el punto de control estará definida por los niveles de carga de los nodos de los niveles inferiores, hasta llegar al punto de control.

Palabras claves: protección ambiental, red inalámbrica de sensores, protocolo de red, ahorro de energía.

Abstract

Now days the preservation of the natural resources have taken a big importance in our country and the world in general. The Costa Rican forests are been threat by illegal practices, like hunting, deforestation and forest fires. That's why it come the idea to use the electronic knowledge to create a wireless sensor network to monitor these kinds of activities. The goal of this project is to develop a monitor tool that allows the communications between different zones in the forest, so when an alarm is activated, the authorities can perform on time their respective action.

Costa Rica has always been internationally famous for his protected zones, making the tourism one of the major incomes for the country and a healthy environment for the people who lives on it. There is the importance of the project since it's necessary to avoid the irrational exploitation of the natural resources of the country in order to give them to the future generations and they're a source of income to the national economy.

The focus of the project is based on the solution for the wireless communication of the monitor system. It contemplates the hardware and the network protocols. This protocol sees the network like a series of logical levels, so the base is going to be in a cero level and when the distance of the teledetectors increases, the level is going to increase too. When an alarm is activated, the information is going to flow to the lower levels until it reaches the cero level.

Key words: environmental protection, wireless sensor network, network protocol, power consumption saving.

A mi familia y amigos, por todo el apoyo brindado mientras esto duró.

Muchas gracias

Agradecimientos:

Agradezco a todos mis compañeros que de una u otra manera me ayudaron en el desarrollo de este proyecto, con su tiempo y sus consejos.

También al profesor Msc. Ing. Néstor Hernández por todo su tiempo y ayuda brindados para lograr la llevar adelante este trabajo.

Además agradezco a la ayuda y consejos brindados por el personal técnico de la Escuela de Ingeniería Electrónica, especialmente a Ronald Soto para la creación de los circuitos impresos del sistema.

A todos, muchas gracias

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1: Introducción	1
1.1 Problema existente e importancia de la solución	1
1.2 Solución seleccionada	3
Capítulo 2: Meta y objetivos	5
2.1 Meta	5
2.2 Objetivo general	5
2.3 Objetivos específicos	5
2.3.1 Objetivos de Hardware	5
2.3.2 Objetivos de Software	6
2.3.3 Objetivos de Documentación	6
2.3.4 Objetivos de Implementación	6
Capítulo 3: Marco teórico	7
3.1 Antecedentes bibliográficos	7
3.2 Descripción del sistema o proceso a mejorar	9
3.3 Descripción de los principales principios físicos y/o electrónicos relacionados con la solución del problema	12
3.3.1 Redes inalámbricas	12
3.3.2 Transmisión inalámbrica	14
3.3.2.1 Medios de transmisión inalámbrica	15
3.3.3 Propagación de ondas de radio en el espacio libre	18
3.3.4 Regulación nacional sobre sistemas RF que no requieren concesión	22
3.3.5 Técnicas de modulación del espectro ensanchado	23
3.3.6 Topologías de Red	27
3.3.7 Redes de sensores	36
Capítulo 4: Procedimiento metodológico	38
4.1 Reconocimiento y definición del problema	38
4.2 Obtención y análisis de información	40

4.3	Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución.....	41
4.4	Implementación de la solución.....	42
4.5	Reevaluación y rediseño.....	44
Capítulo 5: Descripción detallada de la solución		45
5.1	Análisis de las soluciones y selección final.....	45
5.2	Descripción del hardware	54
5.2.1	Dispositivo de comunicación.....	54
5.2.2	Nodo de la red	61
5.2.2.1	Módulo de adquisición de datos	61
5.2.2.2	Módulo de alimentación.....	61
5.2.2.3	Módulo de procesamiento	62
5.2.2.4	Módulo de comunicación.....	65
5.2.2.5	Circuito final nodo de red.....	66
5.2.3	Estación base	68
5.2.3.1	Módulo de alimentación.....	68
5.2.3.2	Interfaz	69
5.2.3.3	Módulo de comunicación.....	70
5.2.3.4	Circuito final estación base.....	71
5.3	Descripción del software.....	72
5.3.1	Protocolo de red.....	72
5.3.2	Software del microcontrolador y control del transceptor	77
5.3.2.1	Rutinas de servicio	78
5.3.2.2	Rutinas del protocolo.....	80
5.3.3	Software del punto de control	83
5.3.4	Software de simulación	85
Capítulo 6: Análisis y resultados		88
6.1	Simulación	88
6.2	Pruebas de campo.....	92
6.3	Hardware	96
Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones.....		100

7.1 Conclusiones	100
7.2 Recomendaciones	101
Bibliografía	102
Apéndices	106
Apéndice A.1 Glosario, abreviaturas y simbología.....	i
Apéndice A.2 Código fuente	ii
Apéndice A.3 Circuitos impresos	x
Apéndice A.4 Información sobre la Institución	xii
Apéndice A.5 Antecedentes prácticos	xv
Anexos	I

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Diagrama de funcionamiento de una red inalámbrica de sensores.	9
Figura 3.2 Espectro electromagnético y sus usos para telecomunicaciones.	14
Figura 3.3 Topología en conexión total.	29
Figura 3.4 Topología en malla.	30
Figura 3.5 Topología en estrella.	31
Figura 3.6 Topología en estrella extendida.	32
Figura 3.7 Topología en anillo.	33
Figura 3.8 Topología en bus.	34
Figura 3.9 Topología en árbol.	35
Figura 5.1 Diagrama de bloques de un nodo de la red.	45
Figura 5.2 Diagrama de bloques de la estación base.	46
Figura 5.3 Descripción del funcionamiento de SPIN.	50
Figura 5.4 Descripción del funcionamiento del protocolo en [13].	51
Figura 5.5 Dispositivo de comunicación utilizado: AC4490 – 1000M.	57
Figura 5.6 Arquitecturas soportadas por el transceptor. (a) Punto a Punto, (b) Multipunto-Multipunto.	58
Figura 5.7 Circuito básico de operación del regulador LM3940.	62
Figura 5.8 Diagrama de pines del PIC16LF874A.	64
Figura 5.9 Interfaz entre el módulo de control y comunicación.	65
Figura 5.10 Diagrama de conexión para el circuito del nodo de la red.	66
Figura 5.11 Diagrama de bloques de la estación base con los componentes que la componen.	68
Figura 5.12 Diagrama de conexión del MAX232.	69
Figura 5.13 Diagrama de conexión para la estación base de la red.	71
Figura 5.14 Descripción de la primitiva S_REQUEST.	74
Figura 5.15 Descripción de la primitiva SEND_S.	75
Figura 5.16 Descripción de la primitiva RETRANS_R.	75

Figura 5.17	Secuencia para la atención de un evento por el protocolo creado.....	76
Figura 5.18	Diagrama de flujo de SET_DEST.....	78
Figura 5.19	Diagrama de flujo de RDA_ISR.....	79
Figura 5.20	Diagrama de flujo de STATUS_REQ.	80
Figura 5.21	Diagrama de flujo de SEND_STATUS.....	81
Figura 5.22	Diagrama de flujo de ASK_RETRANS.....	81
Figura 5.23	Diagrama de flujo de REQUEST.....	82
Figura 5.24	Pantalla principal del programa del punto de control.	83
Figura 5.25	Pantalla principal del programa de simulación.....	85
Figura 5.26	Ubicación de los nodos en el programa de simulación.	86
Figura 6.1	Resultados de la simulación para el protocolo estático.....	89
Figura 6.2	Resultados de la simulación para el protocolo propuesto.	89
Figura 6.3	Resultados de la simulación para los protocolos estáticos.	90
Figura 6.4	Resultados de la simulación para el protocolo desarrollado.	91
Figura 6.5	Detalle de la ubicación de los nodos durante la prueba de campo.	92
Figura 6.6	Diagrama de conexión lógica de los nodos durante la prueba de campo.	93
Figura 6.7	Diagrama de conexión lógica de los nodos para la tercera prueba de campo.	95
Figura 6.8	Prototipo final para la estación base de la red.	99
Figura 6.9	Prototipo final para el nodo de la red.	99
Figura A.3.1	Negativo para la placa impresa del nodo de la red-.....	x
Figura A.3.2	Negativo para la placa impresa de la estación base de la red-	xi

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.1 Características de los dispositivos de comunicación que ofrece el mercado.....	56
Tabla 5.2 Especificación de las señales del AC4490 – 1000M utilizadas.....	60
Tabla 5.3 Datos de los nodos en el programa de control.....	84
Tabla 5.4 Datos de la ruta que sigue la información a través de la red.....	84
Tabla 6.1 Datos recogidos de la primer prueba de campo.....	94
Tabla 6.2 Datos recogidos para la segunda prueba de campo.....	94
Tabla 6.3 Datos recogidos para la tercera prueba de campo.....	95
Tabla 6.4 Consumo de potencia del nodo de la red y sus componentes.....	96
Tabla 6.5 Costos en dólares de los componentes del nodo de la red.....	97
Tabla 6.6 Costos en dólares de los componentes de la estación base de la red.....	98

Capítulo 1: Introducción

1.1 Problema existente e importancia de la solución

En las últimas décadas la sociedad mundial ha tomado conciencia de que los recursos naturales existentes en el planeta no son inagotables y que, por lo tanto, es necesario protegerlos. En nuestro país, como en el resto del planeta, los bosques como el número de especies de fauna y flora ha disminuido de forma muy acelerada y para proteger los que aun quedan se han creado parques y reservas biológicas. Todas estas zonas protegidas necesitan ser vigiladas y protegidas de personas inescrupulosas, sin embargo la cantidad de guardabosques es ridícula, en comparación con el área que tienen que proteger.

Buscando dar una solución a esta necesidad, nace como una iniciativa del profesor Ing. Néstor Hernández Hostaller, un proyecto cuyo objetivo es la protección ambiental, el cual se ha desarrollado desde hace poco más de un año en la Escuela de Ingeniería Electrónica. Este consiste en la implementación de dispositivos de monitoreo, que permitan la detección y prevención de tala de árboles, cacería e incendios en los bosques. Para lograr esto, se han dado a la tarea de realizar tele-detectores de motosierras, del cual ya se cuenta con un prototipo, de disparos y de fuego, estos dos últimos se encuentran en su primera etapa de desarrollo actualmente.

Se pretende que estos dispositivos de monitoreo sean instalados en el bosque y necesiten el mínimo de mantenimiento. Además, buscando alcanzar la cobertura de la mayor área posible, se requiere que estos se comuniquen entres sí como una red inalámbrica de sensores (RIS).

Debido a las características de funcionamiento de las RIS estas presentan una serie de limitaciones, tales como su capacidad para el manejo de datos y algoritmos, rango de comunicación restringido, energía disponible finita. Estas hacen que los protocolos de red usados en estas y las respuestas al fallo de un nodo sean muy particulares para este tipo de sistemas. Otra particularidad es que el rango de comunicación entre dos nodos debe ser, como mínimo, igual o superior al radio de alcance máximo de los teledetectores, de esta manera pretende abarcar la mayor área posible con el mínimo de dispositivos.

El presente proyecto de graduación pretende brindar una propuesta para la fase de comunicación de la futura red de tele-detectores en el bosque, determinando los componentes de comunicación y procesamiento de datos más adecuados para cumplir con los requerimientos del sistema y, a la vez, desarrollando los protocolos que regirán las comunicaciones y el manejo de los datos en dicha red.

Con la creación de esta red de teledetectores se pretende ayudar a la protección ambiental, de manera que con una red y una cantidad pequeña de guardabosques se pueda monitorear un área muchas veces mayor de la que se puede cubrir en la actualidad con el mismo personal humano. También, cabe la posibilidad de que la red y sus protocolos pueden ser utilizados para otras aplicaciones de monitoreo y adquisición de datos, industriales, automatización de sistemas, entre otras.

1.2 Solución seleccionada

El sistema a desarrollar pretende la creación de una red inalámbrica de sensores, dadas las características de su implementación final, este deberá cumplir con los siguientes requerimientos:

Procurar el bajo consumo y ahorro de la energía en tanto para cada nodo, como para la red en general.

Los algoritmos de ruteo deben ser lo más sencillo posibles, pues se cuenta con una capacidad limitada en el manejo de los mismos.

Mantener la integridad de la red en el caso de presentarse un fallo en alguno de los nodos de la misma.

Soportar las condiciones ambientales que implica su instalación en los bosques nacionales.

Tener un costo económico mínimo para que el proyecto sea viable.

En el presente proyecto se pretende brindar una solución para la comunicación inalámbrica de dicha red, para esto será necesario el realizar la selección de los componentes que mejor cumplan con las necesidades del sistema y la creación de los protocolos de comunicación de la misma.

Para la parte física se seleccionaron los componentes que conformarán los tres módulos de hardware; uno de alimentación, conformado por un banco de baterías y un regulador de voltaje LM3940, otro de procesamiento, el cual estará basado en el microcontrolador PIC16LF874A y uno de comunicación, el cual estará soportado por el transceptor AC4490 – 1000M.

Para los protocolos, se concebirá la red como una serie de niveles lógicos, los cuales tendrán a la base en el cero y se irá en aumento conforme se aleje de la misma a razón del rango de alcance de los teledetectores creados.

Cuando se presente un evento, la información recopilada del mismo seguirá un camino descendente a través de los niveles. Cada nodo solicitará a los nodos más cercanos del nivel inferior el estado de su carga y dependiendo de este dato se seleccionará el camino que siga la información. En caso de presentarse un fallo en este proceso, se contará con la capacidad de retransmitir la información a sus nodos vecinos del mismo nivel. Este proceso se repetirá hasta que los datos sean recibidos en el punto de control.

En el capítulo 5 se detallará más a fondo la solución planteada.

Capítulo 2: Meta y objetivos

2.1 Meta

El presente proyecto tiene como meta desarrollar la red de telecomunicaciones para el monitoreo de zonas boscosas que permita la detección remota de actividades que dañen la integridad de la flora y fauna, permitiendo a las autoridades actuar de forma rápida y eficaz en procura de la protección de los recursos naturales de estas áreas.

2.2 Objetivo general

Diseñar e implementar el protocolo y seleccionar los componentes de los módulos de comunicación de la red inalámbrica que permitan recolectar y transmitir la información de los teledetectores de fuego, motosierras y disparos en el bosque.

2.3 Objetivos específicos

2.3.1 Objetivos de Hardware

- Seleccionar los componentes adecuados para la creación de un prototipo de nodo de red que cumpla con los requerimientos de la red.
- Seleccionar los componentes adecuados para la creación de un prototipo de estación base acorde con los requerimientos de la red.
- Implementar los prototipos creados en circuitos impresos.

2.3.2 Objetivos de Software

- Desarrollar el protocolo de comunicación de la red.
- Implementar dicho protocolo como un programa en el microcontrolador.
- Desarrollar el programa de monitoreo requerido en punto de control.

2.3.3 Objetivos de Documentación

- Documentar la información necesaria para la toma de decisiones en el desarrollo del protocolo de la red y la selección de los componentes.
- Realizar recomendaciones para el enlace del prototipo con los teledetectores y con el módulo de control de la alimentación.

2.3.4 Objetivos de Implementación

- Realizar pruebas del protocolo y los prototipos para evaluar su funcionalidad y realizar las mejoras necesarias.

Capítulo 3: Marco teórico

3.1 Antecedentes bibliográficos

Las redes inalámbricas de sensores, a pesar de tratarse de un concepto nuevo en la adquisición de información y datos, se prevé que llegarán a ser de mucha utilidad en un futuro cercano, debido a la gran flexibilidad de aplicaciones que pueden tener.

Debido a que su investigación y desarrollo son bastantes recientes, no se encontraron libros que trataran de forma directa esta temática, sin embargo, mediante una búsqueda realizada en Internet se logró tener acceso a varios artículos y proyectos sobre este tipo de redes realizados en universidades extranjeras, además de investigaciones sobre eficiencia y funcionabilidad de protocolos de comunicación desarrollados éstas. El análisis de estos documentos permitió definir de forma clara los requerimientos y limitaciones de este tipo de redes y sus respectivos protocolos.

En [1], [2], [18], y [20] se expone de forma general el concepto de una red inalámbrica de sensores, sus principales características y desafíos, además se tocan de forma superficial conceptos de topologías de redes, protocolos de comunicación y enrutamiento, manejo de la fuente de alimentación, estructuras de red, estándares aplicables a las redes inalámbricas, principios de comunicaciones inalámbricas y el espectro radioeléctrico.

Por otro lado, en [17] y [19] se habla sobre sistemas informáticos autónomos, los cuales deben ser capaces de cambiar su configuración por si mismos dependiendo de las condiciones que el medio les exija. Basados en esta temática, se expone una red de sensores cuyos nodos son capaces de autoconfigurarse a medida que las condiciones del medio cambien, para lograr adaptarse a estas.

Algunos de los protocolos de comunicación desarrollados por otros grupos de trabajo alrededor del mundo, son mostrados en [3], [6], [11], [12], [13], [16] y [21]. En todos los casos la limitante de la potencia disponible es un factor determinante para el diseño de dichos protocolos, puesto que los sensores se alimentan con baterías y su vida útil está restringida. Para cada propuesta expuesta en estos, se muestran las simulaciones respectivas y comparaciones con protocolos convencionales en el ahorro de energía y se observa un alargamiento del tiempo de funcionamiento de los nodos de la red.

En [4], [9], [22] y [25] se enfoca en la utilización de estructuras de enrutamiento y protocolos basados en tecnología MAC (Medium Access Control), la cuál permite una comunicación direccionada. Además, para comunicaciones MAC se reviso el estándar [15], el cual rige para redes inalámbricas de área personal con bajo ancho de banda (LR-WPAN's, por sus siglas en ingles). Dicho estándar abarca redes con características de comunicación muy similares a la red que se implementaría en este proyecto.

En [7], [8], [23] y [26] se desarrollan y analizan diferentes modelos matemáticos para las redes inalámbricas de sensores. En estos se muestran diferentes tipos de conexiones entre nodos y además se muestran los resultados gráficos de dichos modelos. Por otro lado, en [10], [14] y [24] se exponen diferentes consideraciones para la ubicación geográfica de los nodos, tomando como principal pauta la cobertura total del área y los eventos posibles que abarca la red.

3.2 Descripción del sistema o proceso a mejorar

Los más recientes avances en microelectrónica, integración de circuitos y en comunicaciones inalámbricas ha hecho posible el desarrollo de nodos-sensores de bajo consumo de potencia y de bajo costo, lo cual se convierte en la meta final de este proyecto. Un nodo-sensor es un componente equipado con un módulo de control de energía, un sistema integrado de detección o medición, una unidad de procesamiento y de comunicación. Para el presente trabajo el sistema de detección estará compuesto por los tres teledetectores que se encuentran en etapa de desarrollo. El presente proyecto estará enfocado en ofrecer una solución para el componente de comunicación.

El comportamiento general de una red inalámbrica de sensores radica en que cada nodo-sensor se encarga de obtener información de medio, procesarla y retransmitirla a una estación base. Sin embargo, debido al limitado rango de transmisión, la información deberá pasar a través de otros nodos de la red antes de llegar a su destino final. En la figura 1 se ilustra como la red atiende un evento. Este es detectado por un nodo fuente, el cual se encarga de informar a sus vecinos y estos a los suyos, hasta que la alerta llega a la base.

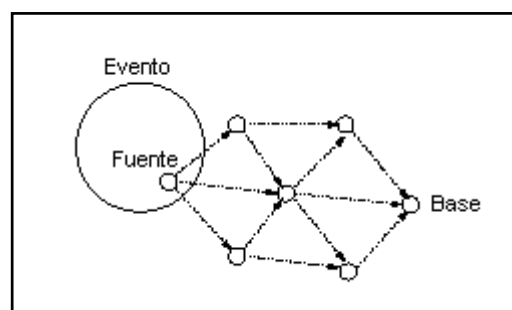


Figura 3.1 Diagrama de funcionamiento de una red inalámbrica de sensores.¹

¹ Tomado de [11].

La red de comunicación que se pretende crear en este proyecto presenta ciertas características que limitan su funcionamiento y las cuales serán los obstáculos a vencer en el diseño del protocolo de comunicación y selección del hardware que la conformarán, estos se detallan a continuación.

Fuente de energía: cada nodo deber ser autosuficiente. Dado que estarán distribuidos en el área a monitorear, estos deberán contar con una fuente independiente la cual tendrá una duración limitada. Por esta razón, en el diseño será una prioridad el ahorro de energía en cada nodo y en la red.

Capacidad de manejo datos y algoritmos: cada nodo requerirá de una unidad de procesamiento de datos. Esta contará con restricciones en el almacenamiento de datos y algoritmos, por lo que el protocolo implementado deberá ser lo más sencillo posible. Además, es importante recalcar que a mayor capacidad de procesamiento, mayor será el consumo de potencia de dicha unidad.

Rango de comunicación: este está directamente relacionado con la energía disponible para la transmisión, pues la potencia de transmisión aumenta proporcionalmente al cuadrado de la distancia a que se requiere transmitir.

Integridad de red: el protocolo de red desarrollado debe procurar disminuir los efectos negativos de los aspectos anteriormente mencionados y a la vez, debe ser capaz de perpetuar la integridad de la red en caso de que ocurra un fallo en algún punto de la red.

Resistencia al medio: debido a que implementación final de presente proyecto requiere su instalación en los bosques, es necesario que los componentes utilizados en la solución sean capaces de soportar las condiciones de temperatura y humedad a los que se verán expuestos.

Se observa como el ahorro de energía es el factor más determinante para el correcto funcionamiento de la red de comunicación a largo plazo. Debido a que se procura prolongar lo más posible la vida útil de la red, las decisiones tomadas para

llegar a la propuesta final girarán principalmente en torno a este punto, como se explicará en los capítulos siguientes.

3.3 Descripción de los principales principios físicos y/o electrónicos relacionados con la solución del problema

3.3.1 Redes inalámbricas²

Una red inalámbrica de datos es un sistema intrínsecamente conectado de equipos de comunicación sin el uso de cable como medio de conexión.

En la actualidad el desarrollo de las redes inalámbricas ha evolucionado de una manera muy acelerada, ofreciendo a los diseñadores una gran gama de posibilidades para solucionar diversos tipos de problemas.

Entre las ventajas que presentan este tipo de redes se pueden mencionar las siguientes:

Movilidad: debido a su naturaleza los sistemas inalámbricos permiten el traslado de los equipos de un lugar a otro siempre y cuando se mantengan dentro del rango de cobertura.

Escalabilidad: el cambio de topología de la red es sencillo, ya sea para pequeñas o grandes redes.

Flexibilidad: permite ubicar los equipos donde el cable no puede llegar.

Reducción de costos: los sistemas inalámbricos cuentan con la ventaja que no requieren de mantenimiento periódico y el gasto de la instalación es muy bajo, debido a que el personal puede ser reducido a sólo un encargado para colocar el equipo requerido. Además de que no existe la necesidad de modificar el entorno a la hora de instalar el equipo.

² Tomado de [28].

Clasificación de redes según el tipo de transferencia de datos que soportan

- Redes simplex (transmisión simple): son aquellas redes en que los datos sólo pueden viajar en un solo sentido.
- Redes Half-Duplex: son aquellas en las que los datos viajan en ambos sentidos pero no simultáneamente, es decir, en el canal sólo puede haber transferencia de datos en un sentido a la vez.
- Redes Full-Duplex: son aquellas en que los datos pueden viajar en ambos sentidos a la vez.

3.3.2 Transmisión inalámbrica³

Las ondas electromagnéticas se propagan en el espacio libre. Estas poseen una frecuencia dada en hertz (Hz), correspondiente a la cantidad de oscilaciones por segundo. La distancia existente entre dos puntos máximos o mínimos consecutivos de la onda se llama longitud de onda y se designa con la letra griega λ .

Al conectarse una antena apropiada a un circuito eléctrico, las ondas electromagnéticas se pueden difundir de manera eficiente y captarse por un receptor a cierta distancia. Toda comunicación inalámbrica se basa en este principio.

La figura 3.2 nos muestra el espectro electromagnético. Las porciones de radio, microondas, infrarrojo y luz visible del espectro pueden servir para transmitir información modulando la amplitud, la frecuencia o la fase de las ondas.

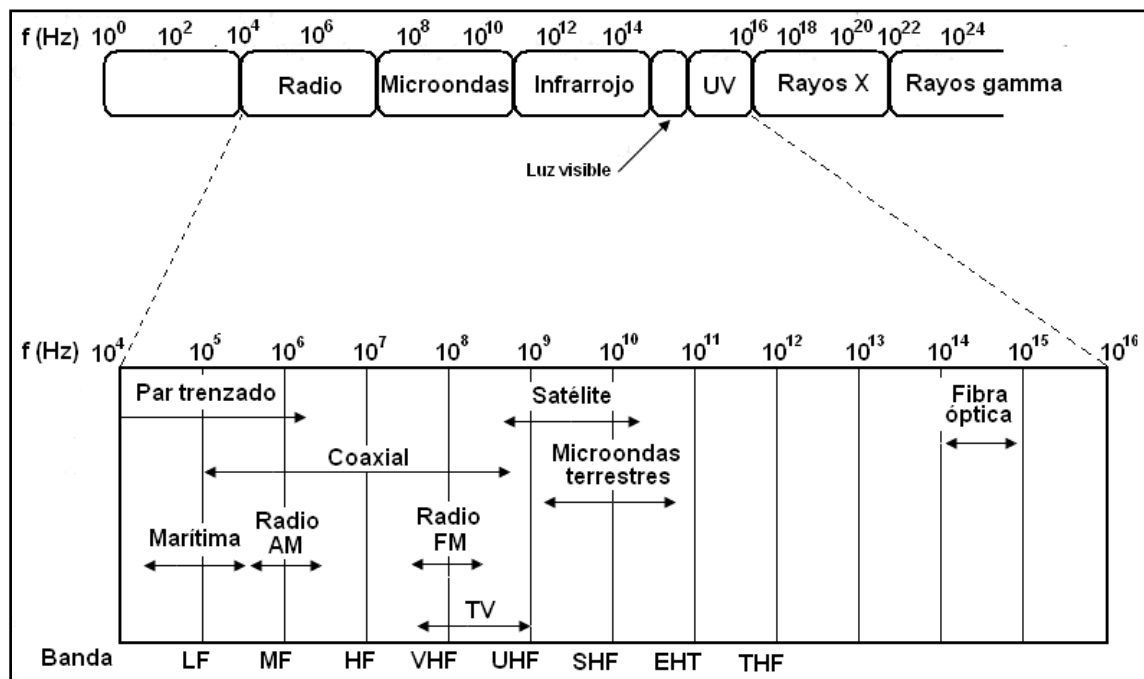


Figura 3.2 Espectro electromagnético y sus usos para telecomunicaciones.⁴

³ Ídem.

⁴ Ídem.

Las ondas electromagnéticas también se pueden propagar en el vacío y todas viajan a la misma velocidad, sin importar su frecuencia. Esta velocidad, llamada velocidad de la luz c , es aproximadamente 3×10^8 m/s.

3.3.2.1 Medios de transmisión inalámbrica⁵

Microondas terrestres:

La banda de frecuencia se encuentra entre los 2 hasta los 40 GHz. A mayor frecuencia mayor ancho de banda, lo que permite mayor velocidad de transmisión.

Para este tipo de medio se utiliza generalmente antenas parabólicas de aproximadamente 3 metros de diámetro. El transmisor debe de estar perfectamente enfocado con el receptor garantizando la línea vista. La distancia máxima entre receptor y emisor es de aproximadamente 7.14 Km.

Este tipo de transmisión permite la comunicación a larga distancia, la cual se presenta como otra alternativa de utilizar como medio el cable coaxial o la fibra óptica, con la ventaja de que no ocupa tanta cantidad de repetidores o amplificadores respecto al cable coaxial.

Entre las aplicaciones principales se encuentran la transmisión de televisión y voz, y los enlaces punto a punto.

Microondas por satélite:

La banda de frecuencia se encuentra entre 1 y 10 GHz. La serie de frecuencias en las cuales operan se conocen como Transpoders.

Es un medio de retransmisión de información para enlazar dos transmisores/receptores terrestres (estación base). La función del satélite es la de amplificar, corregir y retransmitir la señal a una o más antenas.

⁵ Ídem.

Entre las aplicaciones se encuentra la difusión de televisión, transmisiones telefónicas de larga distancia, redes privadas, enlaces punto a punto entre centrales telefónicas en redes públicas, entre otros.

Espectro infrarrojo (IR):

Este tipo de medio es muy utilizado en comunicaciones de corto alcance. Las conexiones son punto a punto como para aplicaciones multipunto en áreas de cobertura limitada.

Las ondas infrarrojas no traspasan objetos sólidos, no presentan problemas de interferencia o seguridad, tampoco tiene problemas de asignación de frecuencias debido a que las bandas utilizadas no ocupan permiso.

Por el momento la máxima velocidad de transmisión por ondas infrarrojas es de 10 Mps.

Transmisión por ondas de luz:

La transmisión por ondas de luz se ha utilizado desde hace siglos. Actualmente se utiliza generalmente para conectar las redes de área local (LAN) entre dos edificios a través de láseres montados en la parte más alta de cada edificio, en cada edificio se tendrá un láser y un foto detector. Esta configuración presenta un ancho de banda alto y de bajo costo, es fácil de instalar y no requiere licencia.

Como desventaja se encuentra que los rayos láser no pueden penetrar la lluvia ni la niebla densa. Tienen un buen funcionamiento en días soleados

Ondas de Radio

Las ondas de radio son fáciles de generar, pueden viajar distancias largas y penetrar edificios sin problemas, de modo que se utilizan mucho en la comunicación, tanto de interiores como de exteriores. Las ondas de radio también son omnidireccionales, o sea viajan en todas las direcciones desde la fuente, por lo cual el transmisor y el receptor no tienen necesidad de alinearse.

Las propiedades de las ondas de radio dependen de la frecuencia.

Ondas de baja frecuencia: a bajas frecuencias, las ondas de radio cruzan bien los obstáculos, pero la potencia se reduce drásticamente con la distancia a la fuente.

Ondas de alta frecuencia: a frecuencias altas, las ondas de radio tienden a viajar en línea recta y a rebotar con facilidad en los obstáculos. También son absorbidas por la lluvia.

Todas las ondas de radio están sujetas a interferencia por los motores y equipos eléctricos.

Debido a la capacidad de viajar distancias largas y la interferencia entre usuarios, los gobiernos legislan el uso de radiotransmisores.

3.3.3 Propagación de ondas de radio en el espacio libre⁶

Las ondas de radio se propagan por el espacio libre en línea recta a la velocidad de la luz. En dicho espacio no existen pérdidas de energía, pero hay atenuación debido a la dispersión de las ondas. La atmósfera terrestre puede considerarse como si se tratara del espacio libre

Atenuación del espacio libre

Al considerar un radiador isotrópico (antena que irradia la misma potencia en todas direcciones) y una esfera que se encuentra a cualquier distancia desde la fuente y concéntrica a ésta, toda la energía de la fuente pasaría por la superficie de la esfera. La energía se dispersa sobre una superficie más grande conforme aumenta la distancia desde la fuente.

Matemáticamente se puede expresar de la siguiente manera:

$$P_D = \frac{P_t}{4\pi r^2} \quad (3.1)$$

Donde P_D = densidad de potencia en watts por metro cuadrado

P_t = potencia total en watts

r = distancia desde la antena en metros

La intensidad de campo eléctrico de la señal se expresa de la siguiente manera:

$$\mathcal{E} = \frac{\sqrt{30P_t}}{r} \quad (3.2)$$

Donde P_t = potencia total en watts

r = distancia desde la fuente en metros

⁶ Tomado de [5].

Ganancia de la antena transmisora

Si una antena transmisora tiene ganancia en una determinada dirección, la densidad de potencia en esa dirección se incrementa por la cantidad de la ganancia, por lo que la densidad de potencia se convierte en:

$$P_D = \frac{P_T G_T}{4\pi r^2} \quad (3.3)$$

Donde P_D = densidad de potencia en watts por metro cuadrado

P_T = potencia total del transmisor en watts

G_T = ganancia de la antena del transmisor

r = distancia del transmisor al receptor, en metros

También se puede expresar la ganancia de la antena transmisora si se considera en una determinada dirección, que la densidad de potencia es la misma que la que se tendría si la antena transmisora se sustituyera por un radiador isotrópico y la potencia del transmisor se multiplicara por la ganancia de la antena. Por lo que se habla de una potencia radiada isotrópica efectiva, la cual se describe en la siguiente ecuación:

$$EIRP = P_T G_T \quad (3.4)$$

Ganancia de la antena receptora

La antena receptora absorbe la energía de las ondas de radio que pasan por ella. Debido a que la potencia es proporcional al área por la que pasa, entonces entre más grande sea una antena, mayor será la energía captada. Además dependen de la posición en la cual se encuentren. Por lo que se sabe que las antenas tienen la misma ganancia si son utilizadas ya sea para transmitir como para recibir.

El área efectiva de una antena se puede expresar como:

$$A_{eff} = \frac{P_R}{P_D} \quad (3.5)$$

Donde A_{efs} = área efectiva de la antena en metros cuadrados

P_r = potencia entregada al receptor en watts

P_D = densidad de potencia de la onda en watts por metro cuadrado

Esta última ecuación indica que el área efectiva de una antena es el área de la cual se extrae toda la potencia de la onda y se entrega al receptor. Por lo que el área efectiva de una antena receptora es:

$$A_{eff} = \frac{\lambda^2 G_R}{4\pi} \quad (3.6)$$

Donde G_R = ganancia de la antena, como una relación de potencia

λ = longitud de onda de la señal

Pérdida de la trayectoria

La potencia del receptor se expresa generalmente en términos de la atenuación del espacio libre, es decir, la razón de la potencia recibida a la potencia del transmisor:

$$\frac{P_R}{P_T} = \frac{\lambda^4 G_T G_R}{16\pi^2 r^2} \quad (3.7)$$

Esta ecuación también puede expresarse en términos de decibeles:

$$\frac{P_R}{P_T} (dB) = [G_T (dBi)] + [G_R (dBi)] - (32.44 + 20 \log d + 20 \log f) \quad (3.8)$$

Donde d = distancia entre transmisor y receptor en kilómetros

f = frecuencia en mega hertz

El término dBi indica que la ganancia de la antena se encuentra respecto a un radiador isotrópico.

Debido a que la señal recibida es menor que la transmitida, la ganancia siempre da negativa (conocida como pérdidas). Por lo que las pérdidas de espacio libre o pérdida de trayectoria se describe como:

$$L_{fs} = 32.44 - [20 \log d(km)] + [20 \log f(MHz)] - [G_T (dBi)] - [G_R (dBi)] \quad (3.9)$$

Donde $L_{fs} = 10 \log \frac{P_T}{P_R}$

En la ecuación anterior no se consideran las pérdidas de la línea de transmisión o desacoplamiento.

3.3.4 Regulación nacional sobre sistemas RF que no requieren concesión⁷

Propiedad del servicio

Estos servicios se caracterizan por utilizar emisiones de muy baja potencia que minimizan la posibilidad de interferencia perjudicial, poseen una notable inmunidad a las interferencias provenientes de emisiones similares con métodos convencionales de modulación y que tales características que permiten mejorar considerablemente la eficiencia en el uso del espectro, y aliviar la congestión de segmentos del mismo destinando grupos de frecuencias para que operen en forma compartida o bien que compartan las frecuencias asignadas mediante sistemas diferentes de modulación.

Consideración de los servicios

Se consideran los servicios que no requieren concesión para utilización del espectro electromagnético los siguientes:

- a) Los que utilizan la tecnología de Espectro Disperso (Spread Spectrum) en la banda de 2400 a 2483.5 MHz únicamente.
- b) Los servicios General Compartidos que operan en las frecuencias señaladas en el Plan Nacional de Atribución de Frecuencias que utilizan antena incorporada y con una potencia máxima de 2 Watts.
- c) Todos aquellos servicios que utilicen potencias inferiores a 200 mili watts sin antena externa o que su radio de cobertura no sea mayor de 200 metros.

⁷ Tomado de la Regulación Nacional sobre el espectro radioeléctrico.

3.3.5 Técnicas de modulación del espectro ensanchado⁸

Las técnicas de modulación del espectro ensanchado son aquellas que cumplen con las siguientes características:

- El ancho de banda de la señal transmitida es mucho mayor que el ancho de banda del mensaje original.
- El ancho de banda de la señal transmitida es determinado por el mensaje que se va a transmitir y de una señal conocida como Spreading Code.

Básicamente existen dos tipos de técnicas: Salto de Frecuencia (FHSS) y Secuencia Directa (DSSS).

Al transmitir datos sobre anchos de banda mucho mayores que el mínimo requerido, las técnicas de modulación de espectro ensanchado presenta dos grandes ventajas: densidad de potencia baja y redundancia.

La densidad de baja potencia se refiere al hecho de que la energía transmitida es extendida sobre una amplia banda, por lo que la cantidad de energía en una frecuencia específica es muy baja. El efecto de la densidad de baja potencia de la señal transmitida es que dicha señal no interfiere la actividad de otros sistemas receptores que se encuentren en la misma área y, además, la señal no puede ser detectada por intrusos, proveyendo un alto nivel intrínseco de seguridad.

La redundancia se refiere al hecho de que el mensaje se encuentra a diferentes frecuencias por lo que se puede recuperar en caso de que se presenten errores. El efecto de la redundancia es que los sistemas del espectro ensanchado presentan alta resistencia al ruido y a la interferencia, lo que permite recobrar la información aún cuando se presente ruido en el medio.

Esta técnica de modulación está compuesta de dos procesos de modulaciones consecutivas que se realizan en la señal portadora:

⁸ Tomado de [27].

- Proceso 1: realizado por el spreading code, también conocido como spreading process. Este proceso genera un amplio ancho de banda para la señal transmitida.
- Proceso 2: realizado por el mensaje a transmitir.

A continuación se describen los procesos tanto para FHSS como para DSSS:

Salto de Frecuencia (FHSS)

Proceso 1 (Modulación del spreading code)

La frecuencia de la portadora es periódicamente modificada seguida de una secuencia específica de frecuencias.

En los sistemas FHSS, el spreading code es la lista de frecuencias que se deben de usar para la señal portadora (conocido como “hopping sequence”).

La cantidad de tiempo entre cada salto de frecuencia se conoce como dwell time (tiempo de permanencia) y es de aproximadamente 100 ms.

Proceso 2 (Modulación del mensaje)

El mensaje modula la portadora (FSK), por lo que se genera una señal de banda estrecha durante cada permanencia (dwell time), pero si el proceso es observado en períodos de tiempo en el orden de los segundos, entonces se observa como un generador de una señal de banda amplia.

Secuencia Directa (DSSS)

Proceso 1 (Modulación del spreading code)

Por el tiempo que tarda cada bit del mensaje enviado, la portadora es modulada (PSK) seguida de una secuencia específica de bits (conocida como chips). El proceso se denomina “chipping” y el resultado es la substitución de cada bit del mensaje por la misma secuencia de los chips.

En los sistemas DSSS, el spreading code es la secuencia de chips utilizada para representar los bits del mensaje.

Proceso 2 (Modulación del mensaje)

Cuando se presentan ceros en los bits del mensaje, la secuencia de chips utilizada para representar los bits utiliza la misma lógica que en el proceso 1 descrito anteriormente. En el caso que se presenten unos, la secuencia de chips también es igual al proceso 1 pero invertida. Asimismo, tanto los ceros como los unos del mensaje, son representados por diferentes secuencias de chips (siendo una la versión invertida de la otra).

La redundancia se consigue mediante la presencia del bit del mensaje en cada chip del spreading code. Aun cuando algún chip del spreading code es afectado por el ruido, el receptor puede reconocer la secuencia y tomar la decisión correcta respecto al bit del mensaje recibido.

Al analizar ambas tecnologías no se puede determinar cuál de las dos es mejor, ya que dependiendo de la aplicación FHSS puede tener un mejor desempeño que DSSS y viceversa. A continuación se presentan las características más importantes de cada uno:

Tecnología Secuencia Directa

DSSS tiene la ventaja de proveer mayores capacidades que FHSS, pero es una tecnología muy sensible a factores ambientales (especialmente a reflexiones). La mejor manera de minimizar dichas influencias es utilizándola en aplicaciones de corta distancia punto a multipunto o en aplicaciones de larga distancia pero con topología punto a punto. En ambos casos los sistemas pueden aprovechar la ventaja de la alta capacidad que ofrece DSSS, sin que se vean afectadas por los efectos que producen las reflexiones.

Tecnología Salto de Frecuencia

FHSS es una tecnología robusta, la cual es casi inmune al ruido, las reflexiones, otras estaciones de radio o factores ambientales. Además la cantidad de sistemas activos simultáneos en una misma área geográfica es significativamente mayor que el equivalente a un sistema DSSS.

Los sistemas que usan esta tecnología consumen menos potencia que los de secuencia directa, y generalmente son más económicos.

Debido a estas características la tecnología FHSS es utilizada en diseños donde se deben de cubrir áreas amplias con una gran cantidad de módulos y donde el uso de antenas direccionales para minimizar la influencia de los factores ambientales es imposible.

3.3.6 Topologías de Red⁹

La disposición de los diferentes componentes de una red se conoce con el nombre de topología de red. Existen dos tipos de topologías en una red de comunicaciones:

- *Topología Física:* comprende la disposición real de los dispositivos de comunicación.
- *Topología Lógica:* describe el comportamiento del flujo de información a través de una red, lo cual es utilizado para determinar donde pueden producirse las colisiones.

Una red puede tener un tipo de topología física y un tipo completamente diferente de topología lógica.

Una red de comunicaciones está compuesta de nodos, los cuales, además de su capacidad de procesamiento de datos, tienen como característica la transmisión y recepción de datos a través de los enlaces establecidos, ya sea por un medio cableado o inalámbrico.

Los dos tipos más comunes de topologías lógicas son Broadcast y transmisión de tokens.

Topología Broadcast

En esta configuración cada nodo envía sus datos hacia todos los demás nodos sin considerar un orden específico. Los dispositivos no siguen ningún orden para utilizar la red, sino que cada uno accede a la red para transmitir datos en el momento en que lo necesite.

⁹ Tomado de [18]

Topología Token

La transmisión de tokens controla el acceso a la red al transmitir un token eléctrico de forma secuencial a cada nodo. Cuando un nodo recibe un token, significa que puede enviar datos a través de la red. Si el nodo no tiene ningún dato para enviar, transmite el token hacia el siguiente nodo y el proceso se vuelve a repetir.

Entre las topologías físicas más utilizadas se pueden mencionar las siguientes:

Topología en conexión total (malla completa)

Su principal característica es que todos los nodos están entre conectados, proporcionando un sistema robusto, como se muestra en la figura 3.3. En el caso de que algún enlace falle, los datos son transmitidos por una nueva ruta hacia su destino. Esta configuración es empleada en los casos en que una ruptura en la comunicación no es posible.

Este tipo de topología presenta el problema de que conforme se aumenta la cantidad de nodos, la cantidad de enlaces se incrementa exponencialmente, aumentando la complejidad de la misma. Por lo tanto, en redes amplias, se presenta un problema de enrutamiento aún cuando se cuente con recursos de gran poder de procesamiento computacional.

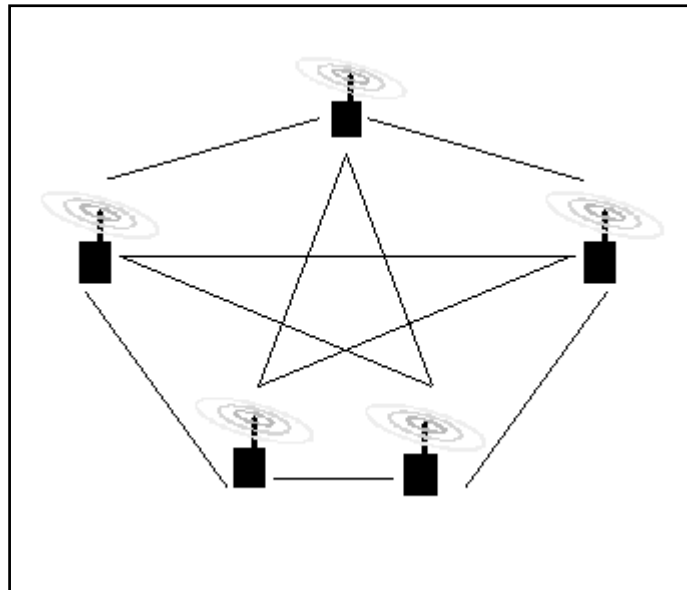


Figura 3.3 Topología en conexión total.

Topología en malla

Esta topología tiene distribuidas redes en forma regular que generalmente solo pueden comunicarse con el vecino más cercano del nodo, como se muestra en la figura 3.4. Normalmente los nodos de estas redes son idénticos, debido a ello, las mallas también son conocidas como redes de igual a igual (peer to peer). Debido a que existen múltiples caminos de enrutamiento entre nodos, este tipo de redes es robusto ante fallas individuales de nodos o enlaces. Una ventaja de la conexión malla es que, al ser todos los nodos idénticos y tener el mismo nivel de procesamiento y transmisión, ciertos nodos pueden ser escogidos como “líderes de grupo”, los cuales realizan funciones adicionales. Si un líder de grupo es deshabilitado, entonces otro nodo puede tomar sus funciones.

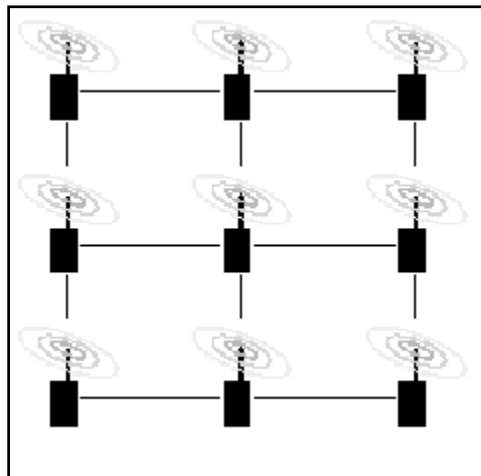


Figura 3.4 Topología en malla.

Topología en estrella

En esta configuración todos los nodos están conectados a un solo nodo concentrador, la figura 3.5 ilustra esto. Dicho concentrador manipula una mayor cantidad de datos, procesos de enrutamiento y capacidad de toma de decisiones que los otros nodos. Si uno de los enlaces es deshabilitado, solo afecta un solo nodo. Sin embargo, si el concentrador deja de funcionar toda la red desaparece.

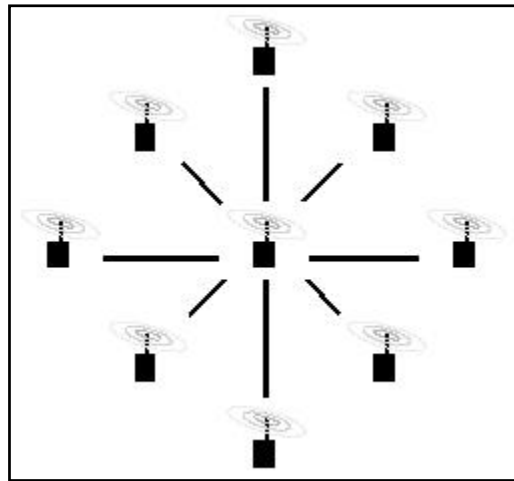


Figura 3.5 Topología en estrella.

Topología en estrella extendida

Este tipo de configuración emplea la topología estrella como base, su diagrama se muestra en la figura 3.6. Esta enlaza diversas estrellas a través de sus nodos concentradores, extendiendo de esta manera la longitud y el tamaño de la red.

Presenta como ventaja que limita el número de dispositivos necesarios para interconectar cualquier nodo concentrador.

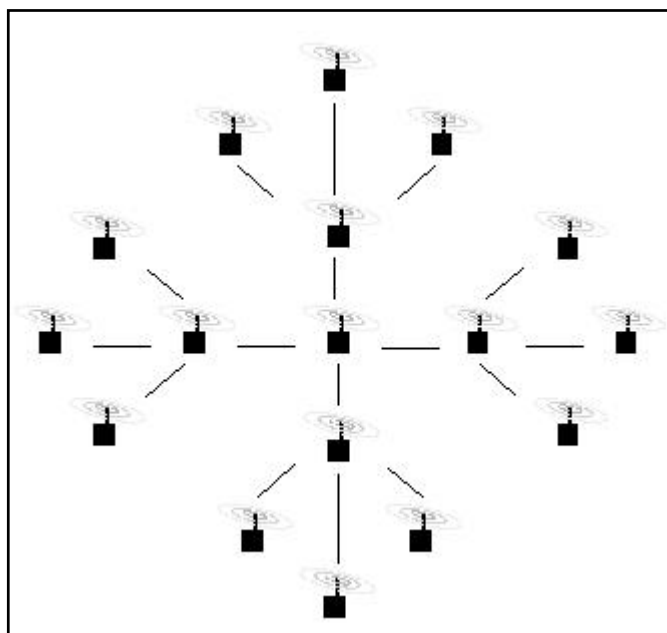


Figura 3.6 Topología en estrella extendida.

Topología en anillo

En esta topología todos los nodos realizan las mismas funciones y no existe un nodo líder, esto se observa en al figura 3.7. Los datos por lo general viajan en una sola dirección. Sin embargo si el anillo es cortado, entonces toda la comunicación se pierde. Para evitar el caso antes mencionado se emplea una configuración de doble anillo, utilizando un anillo primario para el funcionamiento normal y uno de respaldo en caso de que el primario sea cortado.

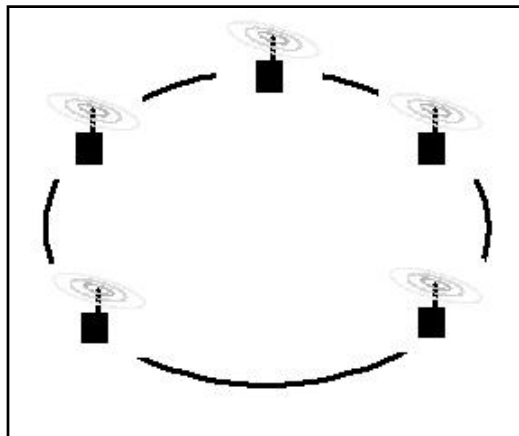


Figura 3.7 Topología en anillo.

Topología en bus

Esta configuración tiene todos los nodos directamente conectados a un solo enlace (backbone), los datos son enviados a través del bus, como lo muestra la figura 3.8. Cada uno de los nodos verifica la dirección destino en el encabezado del mensaje, en caso de que no corresponda con su dirección, el mensaje es descartado. Este tipo de topología es pasivo en el sentido de que cada nodo simplemente escucha el mensaje y no es responsable de la retransmisión de ningún mensaje.

Como ventaja se puede mencionar que todos los dispositivos están conectados entre sí, en los casos en que se desee una comunicación directa. Por otro lado, si se presenta una ruptura del enlace, se pierde la comunicación entre dispositivos.

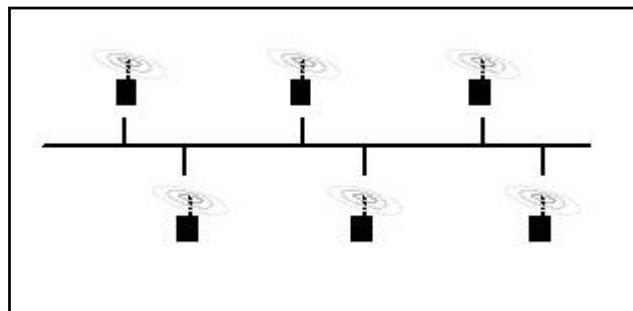


Figura 3.8 Topología en bus.

Topología en árbol

Esta topología es similar a la estrella extendida. Su diferencia radica en que no se utiliza un nodo concentrador, sino que utiliza un nodo troncal desde el que se ramifica a otros nodos, como se observa en la figura 3.9. El flujo de información es jerárquico.

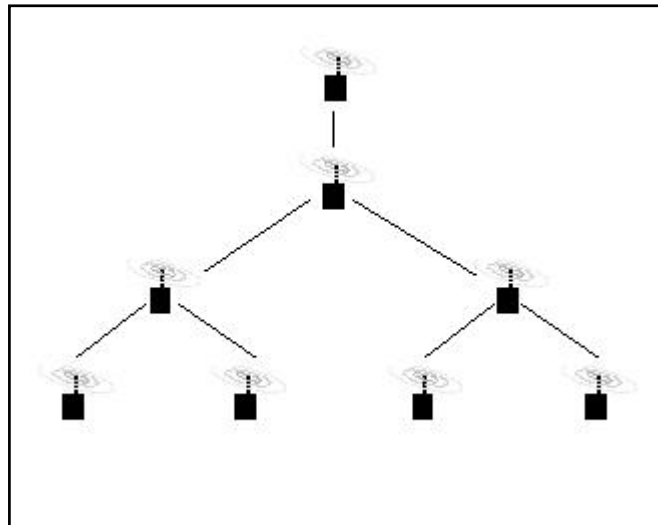


Figura 3.9 Topología en árbol.

La principal consideración al implementar una red de comunicación es la calidad de servicio (QoS) que se quiere ofrecer. Entre los factores que afectan la calidad de procesamiento de datos en una red se pueden mencionar los siguientes:

- Retrasos en la transmisión de datos
- Tasa de error por bit, pérdidas de paquetes de información
- Costo económico de la transmisión
- Consumo de potencia

Dependiendo de la calidad de servicio, consideraciones económicas, el entorno donde se instale la red y la aplicación, se determina el tipo de topología a utilizar. Una red puede estar constituida de varias subredes interconectadas con diferentes tipos de topologías.

3.3.7 Redes de sensores¹⁰

Una red de sensores es una red inalámbrica compuesta de sensores pequeños y de bajo costo, los cuales se encargan de recolectar información del entorno. Este tipo de redes facilita la vigilancia y el control del entorno físico desde ubicaciones remotas con una mayor precisión. Entre sus aplicaciones se pueden mencionar la vigilancia ambiental, asuntos militares y la recolección de información de lugares de difícil acceso.

Los nodos de sensores tienen limitaciones tanto de consumo de potencia y de capacidad de procesamiento debido a su bajo costo e infraestructura del entorno donde es implementado el sistema. Para contrastar estas deficiencias se hace uso de más sistemas más eficientes de enrutamiento que disminuyen el consumo de potencia, algoritmos de localización de nodos y diseño planificado del sistema.

El uso de varios sensores se justifica cuando se desea realizar un estudio de un fenómeno que no tiene una ubicación conocida, permitiendo un análisis más amplio. Además, en muchos casos, múltiples sensores son requeridos para eliminar obstrucciones y limitaciones de línea vista, entre otras.

A pesar de las diversas aplicaciones de este tipo de red, existen varios obstáculos que se deben superar debido a los siguientes factores:

Independencia de conexiones inalámbricas

La mayoría de los nodos de sensores son ubicados en regiones donde no existe ningún tipo de infraestructura. Ejemplo de ello es cuando se desea realizar una red de este tipo en un bosque. En este caso la identificación de la conectividad y distribución de información depende de la capacidad de los nodos.

¹⁰ Tomado de [2].

Inalteración

Los nodos de sensores no están conectados a ninguna infraestructura que logre suplir el consumo de energía. Sólo existe una fuente finita de energía que debe ser optimizada para el procesamiento de datos y la comunicación entre nodos. El mayor consumo de energía se debe al proceso de comunicación, por lo que se debe de minimizar en la medida posible.

Cambios dinámicos

Es necesario que las redes de sensores sean adaptables a cualquier cambio en la conectividad (por la adición de más nodos, falla en algún nodo, etc.), Además de cambios en el entorno mismo.

Capítulo 4: Procedimiento metodológico

En este capítulo describe la serie de pasos seguidos para lograr la consecución de los objetivos planteados para el presente trabajo. Para esto se uso como base la estructura del método de diseño en ingeniería, el cual es muy similar al método científico. El primer paso será la definición del problema, luego se procederá a realizar un análisis para definir las posibles soluciones y seleccionar la más adecuada, de esta manera llegar a la implementación de la misma para obtener conclusiones y realizar las mejores pertinentes. A continuación se detallada más a fondo en estos pasos.

4.1 Reconocimiento y definición del problema

En las últimas décadas, a nivel mundial se ha brindado especial interés a la perdida de los recursos naturales del planeta, especialmente a la perdida de las zonas boscosas, debido al gran número de consecuencias negativas que esto acarrea. Diariamente se ve en los medios de comunicación nacionales como la tala ilegal, los incendios forestales y la caza ilegal atentan contra la integridad de la flora y fauna nacional.

Enfocados en esta problemática, nace la idea de buscar la forma de utilizar las herramientas que ofrece la electrónica para ayudar a evitar la pérdida de nuestros recursos más preciados. Asimismo se propone la creación de una red inalámbrica de detección de estas actividades ilegales en los bosques nacionales, intentando hacer más ágil y eficaz la respuesta de las autoridades ante estas amenazas.

Este ambicioso proyecto implica involucrar muchas otras disciplinas aparte de la electrónica, por esta razón ha sido fragmentado en diferentes frentes de trabajo con actividades muy específicas, pero a la vez relacionadas. En el presente proyecto está enfocado ofrecer una primera solución a la comunicación inalámbrica

de la red, seleccionando los componentes de hardware que la conformarán y desarrollando un protocolo de comunicación para la misma.

Para lograr lo anterior, se ha dividido el proceso en varios sub-problemas. El primero será la selección de los componentes que conformarán los circuitos para la estación base y nodo de la red, los cuales deberán tener un bajo consumo de potencia y cumplir con los requerimientos del medio ambiente. Luego, será imperativo desarrollar un protocolo de comunicación que sea soportado por el hardware seleccionado y que procure el ahorro de energía en cada nodo, como en la red en general. Finalmente, será necesario desarrollar el software con la interfaz de usuario para el punto de control.

Los componentes que conformarán dicha red, tendrán que cumplir con ciertas restricciones. La más crítica será que la fuente de alimentación es limitada, puesto que cada nodo debe ser autosuficiente, por lo cual debe procurarse un mínimo consumo de potencia. Se contará con recursos de software limitados, por lo que la cantidad de datos y complejidad de los algoritmos desarrollados deberán ser los más simple posible. Las condiciones ambientales de los bosques nacionales requiere que el hardware del sistema sea capaz de soportar variaciones de temperatura muy amplias, menos de 20° C en bosques lluviosos de las zonas altas y más de 40° C en los bosques secos en las zonas altas, además de variaciones de humedad en las diferentes estaciones del año.

4.2 Obtención y análisis de información

En esta etapa se recoge toda la información referente al proceso a tratar, con lo cual se obtienen las bases teóricas necesarias para plantear las posibles soluciones y a la vez determinar cual es la que mejor se ajusta a las necesidades.

Para el presente proyecto la fuente fundamental fue la Internet, ya que se trata de un tema de estudio muy nuevo y no se encontró bibliografía que tratara el tema directamente. A pesar de esto, se ubicaron gran número de trabajos de investigación y reportes de implementación desarrollados en centros de investigación y universidades de todo el mundo. Gracias a estos artículos fue posible una mejor concepción del problema en cuestión, lo cual permitió orientar los esfuerzos en los puntos de más interés, definiendo muy claramente los requerimientos y limitaciones del sistema. Además, se logró observar gran número de soluciones desarrolladas en otras partes del mundo, lo cual ahorró tiempo evitando tomar caminos que no eran adecuados y a la vez generó ideas de cómo dar solución a nuestro caso de estudio. Por otro lado, se colectó información sobre las nuevas tendencias en el diseño de este tipo de redes y estándares aplicables a este tipo de aplicaciones.

También, se contó con el apoyo de los compañeros que trabajaban en los otros frentes de trabajo de proyecto, ya que se debieron de tomar en cuenta características de los otros módulos del sistema para el diseño del sistema de comunicación.

4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución

Gracias a la información recolectada se logró definir los parámetros que debería cumplir el hardware del sistema, lo que permitió seleccionar los dispositivos que sustentarían la solución de comunicación. Además, se llegó a una propuesta del circuito para un nodo de la red y de la estación base, esta última se encargará de recolectar los datos de monitoreo y presentarlos en una interfaz con el usuario final en el punto de control.

Por otro lado, en los artículos se contaba con varias soluciones existentes para los protocolos de comunicación en sistemas similares, con sus respectivos estudios de funcionamiento y desventajas. Todas estas se presentaban como muy buenas opciones, sin embargo, el presente proyecto está dirigido a una aplicación muy específica, lo cual impidió la utilización directa de una de estas.

A pesar de esto, los trabajos realizados por estos grupos brindaron las ideas y fundamentos que dieron paso a las primeras hipótesis, así se conformaron las primeras premisas que la solución final debía contemplar. Estas fueron, que el protocolo debía procurar la integridad de la red en caso que ocurra un fallo en algún nodo, a su vez, debe procurar por el ahorro de energía en cada proceso de comunicación, estas dos implican que el mecanismo de ruteo deber ser dinámico. Además, se observó que el protocolo debía incluir algoritmos sencillos y manejo de pocos datos, pues el dispositivo de procesamiento es limitado tanto en memoria como en manejo de operaciones.

Tomando en cuenta estos factores se obtuvieron los circuitos que conformarán el hardware a utilizar y se generó una propuesta del protocolo, ambos en espera de su implementación para evaluar su funcionalidad.

4.4 Implementación de la solución

Esta etapa se requirió invertir la mayor cantidad de tiempo, pues es acá donde se ponen a trabajar todas las ideas generadas en los pasos anteriores de investigación y diseño.

Primeramente se procedió montaje en proto-board del circuito del nodo para obtener una correcta interfaz entre el microcontrolador y el dispositivo de comunicación seleccionados. Debido a que el proveedor de este último no nos facilitó los diagramas de tiempos de los comandos de configuración, fue necesario utilizar el analizador lógico para obtener esta información de forma empírica. Esto facilitó el montaje del hardware de la estación base, la cual estaría conectada a una PC. Una vez probados ambos circuitos se procedió a montarlos en una placa impreso, cuyo diagrama de conexión fue desarrollado en la herramienta Eagle. En el caso de los nodos se fabricaron varias unidades para lograr el montaje del plan piloto.

Teniendo los circuitos funcionando correctamente, se inició el desarrollo del software del sistema. Las rutinas que soportarán el protocolo diseñado fueron escritas en la herramienta PICC, la cual permite crear programas de nivel ensamblador en un ambiente de más alto nivel como C, estos serán cargados en la unidad de procesamiento. Por otro lado, la interfaz con el usuario final en la PC fue desarrollada en Delphi, el cual es un lenguaje de muy alto nivel. Paralelamente se utilizó este compilador para generar un programa capaz de hacer pruebas al sistema y a la vez monitorear el comportamiento del mismo a la hora de atender una alarma.

Con la consecución de las etapas anteriores, se procedió a la puesta en práctica del plan piloto, con el cual se pretende exponer la red a diferentes escenarios para evaluar la respuesta del protocolo y a la vez observar las pérdidas de energía que podrían generarse en cada uno de los nodos para realizar las mejoras del caso.

Para lograr contemplar el funcionamiento del protocolo desarrollado en un escenario con un mayor número de nodos, se dio a la tarea de crear en Delphi una herramienta de simulación. Luego este programa fue modificado para correr otros protocolos basados en la conectividad entre nodos utilizada en la etapa anterior, de esta manera se pretende obtener otras conclusiones aparte de las generadas por las pruebas con el plan piloto.

4.5 Reevaluación y rediseño

Con el análisis de las pruebas realizadas y la experiencia de investigación recopilada se logró generar las recomendaciones para optimizar la propuesta de hardware y a la vez los protocolos desarrollados.

También, hay que recalcar que el producto final de este proyecto es parte un elemento más grande y complejo, asimismo se hacen sugerencias para la conexión con los otros módulos. Además, se recomienda que el proceso de diseño del nodo-sensor se haga de forma integral, tomando en cuenta las variables que ofrece cada módulo, procurando obtener un dispositivo autosuficiente capaz de administrar eficientemente los recursos con los que cuenta.

Por otro lado, siendo un poco ambiciosos, se sugiere la investigación y puesta en marcha de otro grupo de trabajo para la creación de un componente de comunicación inalámbrica específico para esta red, pues actualmente se convierte en el elemento que mayor cantidad de recursos demanda, tanto en lo energético como en lo económico, lo cual permitiría ofrecer una red más eficiente y rentable.

Capítulo 5: Descripción detallada de la solución

5.1 Análisis de las soluciones y selección final

La creación de la red inalámbrica de comunicación lleva consigo la creación e implementación de la capa física y capa de red. La primera contempla la selección del hardware, tanto para los nodos como para la estación base y su montaje en placas impresas. La segunda se requiere la obtención del protocolo que mantendrá la conexión entre los miembros de la red.

Para la capa física será necesario seleccionar los componentes que conformarán y conectarlos para obtener los circuitos de la red, en otras palabras, crear un prototipo de nodo y otro de estación base. En la figura 5.1 se muestra el diagrama de bloques básico para el nodo completo del sistema final. Este está compuesto por un módulo de alimentación y un módulo de adquisición de datos, el cual reúne los diferentes teledetectores. Ambos se encuentran en etapa de desarrollo por los otros grupos de trabajo, por esta razón el presente proyecto no contempla la creación de la circuitería para estos dos módulos, sin embargo la información que estos ofrecen al módulo de procesamiento deberá ser simulada por software.

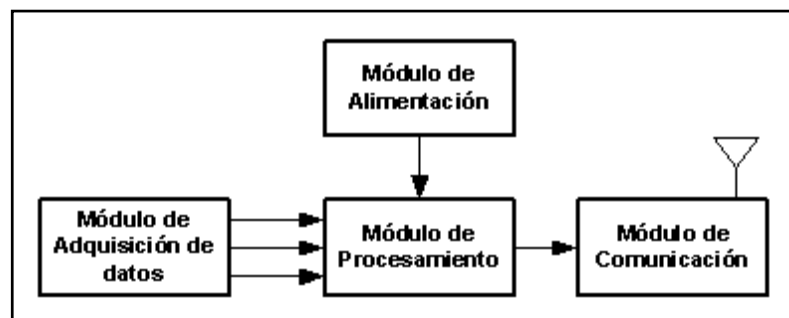


Figura 5.1 Diagrama de bloques de un nodo de la red.

En el presente proyecto los esfuerzos serán dirigidos en la obtención de los módulos de procesamiento y comunicación. Para el primero se decidió utilizar el microcontrolador PIC16LF874A, el cual cumple con los requerimientos del sistema, sin embargo, este ofrece más recursos de los necesarios para esta aplicación, los cuales se prevé que sean utilizados por alguno de los otros módulos en desarrollo. Para el segundo se eligió usar el AC4490 – 1000M, fabricado por Aerocomm, cual utiliza direcciones MAC (Medium Access Control) para seleccionar el destino de los datos y soporta la arquitectura multipunto- multipunto. Este fue seleccionado después de una intensa búsqueda en el mercado de este tipo de dispositivos; las razones para su selección serán detalladas en la descripción de hardware.

Para la estación base se tiene el diagrama de bloques que se muestra en la figura 5.2. Para este circuito se utilizó el mismo dispositivo de comunicación, el cual se encargará de recibir los datos recogidos por la red, estos serán enviados hacia una PC mediante el protocolo RS232. Para lograr esto, se utilizó un convertidor de voltaje MAX232. Los datos en el punto de control serán procesados y serán mostrados al usuario mediante una herramienta de software. El programa del punto de control fue creado en Delphi, pues este compilador presenta muchas facilidades para la creación de interfaces amigables con el usuario, el trabajo con bases de datos y comunicación vía puerto serie.

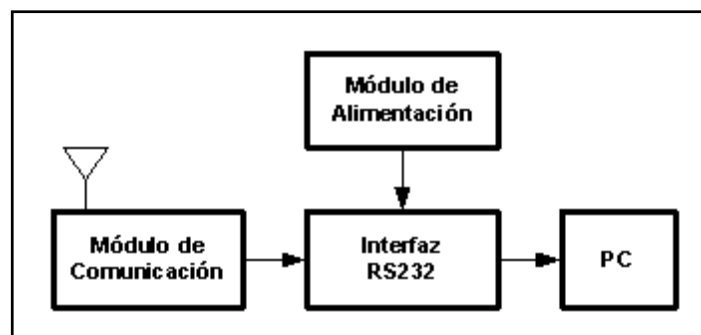


Figura 5.2 Diagrama de bloques de la estación base.

Tanto para la estación base como para el nodo de la red se comprobó la funcionalidad de su circuito en proto-boards y luego se implementó una placa impresa para cada uno, haciendo más sencilla la creación de varios nodos para las futuras pruebas de campo de la red.

Para la capa de red, la investigación realizada en las distintas fuentes consultadas, principalmente artículos sobre trabajos realizados en otras universidades del mundo, permitieron definir los retos a resolver y las características de las redes de sensores que deben tomarse en cuenta para llegar al protocolo de comunicación que cubrirá todas estas variables. En las soluciones para la comunicación propuestas en los textos revisados, se determinaron las características primordiales de las redes de sensores inalámbricas, las cuales componen los criterios de diseño utilizados en este trabajo. A continuación se explica cada uno de ellos.

La meta primordial en el funcionamiento de este tipo de sistemas es el ahorro de energía, ya que cada componente de la red debe ser autosuficiente y, debido a su característica inalámbrica, su fuente de alimentación será limitada. Actualmente existe otro grupo trabajando en el módulo de potencia, el cual se prevé que podrá recargarse mediante el uso de paneles solares, lo cual alargaría la vida útil de la carga, pero no asegura que siempre se cuente con los recursos necesarios para realizar las funciones requeridas. Por esta razón, el protocolo desarrollado tendrá como meta principal el ahorro de la energía presente en cada nodo y en la red en general.

Acorde con dicha meta, la red permanecerá “dormida” hasta que se presente un evento. Esto quiere decir que no habrá ninguna comunicación, pues este proceso es el que más gasto energético demanda, a menos que algún teledetector se active en alguno de los nodos. Será imposible apagar los teledetectores, pues estos tienen que reaccionar en tiempo real y en el caso especial de los disparos, cualquier tiempo de inactividad podría causar la no-detección de un evento.

En una red de sensores, a diferencia de la mayoría de redes informáticas, el flujo de información siempre llevará la misma dirección, es decir, desde donde se presencia un evento hacia la estación base. Debido a que se pretende realizar un monitoreo, toda la información generada por los nodos debe llegar a un punto de control, donde se podrá analizar la información para tomar las medidas respectivas.

Otro factor a considerar es que se cuenta con capacidades de limitadas en el almacenamiento de datos y el manejo de algoritmos en cada nodo, esto implica que los protocolos deberán ser lo más sencillo posibles, procurando no superar estos límites.

En la literatura consultada se proponen varios protocolos para red, sin embargo, debido a lo específico de la aplicación requerida no es posible usar alguno de estos, sin embargo serán comentados a continuación para identificar sus debilidades y fortalezas, algunas de las cuales serán consideradas para la solución planteada. Para facilitar la comprensión, de ahora en adelante se entenderá como “fuente” al nodo que presencia un evento en su área de monitoreo, sus “vecinos” serán los nodos que están dentro de su rango de alcance de comunicación.

En [3] se propone RWPS (Remote Watching Power Saving) el cual propone que cada nodo debe conocer su posición en el espacio y el estado de su batería, además los nodos deben estar sincronizados en el tiempo. Cuando una fuente se activa, esta informará a sus vecinos y estos responderán con sus coordenadas y estado de carga. Con esta información la fuente calculará la distancia hacia cada vecino y evaluará la energía disponible en cada uno, con esto elegirá al más apto para que se encargue de retransmitir la alarma.

Las desventajas de RWPS se describen a continuación. Tener que realizar cálculos matemáticos y mantener un reloj para cumplir con la sincronización hace que se demande muchos recursos a la unidad de procesamiento, la cual también deberá manejar gran cantidad de datos de cada uno de vecinos, por lo cual se descarta para este proyecto.

En [16] se expone Directed Diffusion, en el cual se contempla que cada nodo conoce su ubicación mediante un sistema GPS (Global Positional System). La fuente realiza el ruteo seleccionando al nodo más cercano. Al igual que en RWPS, se requiere calcular la distancia entre nodos, esto involucra mayor cantidad de algoritmos. También, la utilización de un receptor GPS lleva consigo un gasto mayor en lo que a energía y presupuesto se refiere. Además, no toma en cuenta la energía disponible en los vecinos para hacer la selección, lo cual es primordial en el presente proyecto.

En [11] se proponen diferentes sistemas de ruteo basados en la estructura definida en Directed Diffusion. Con la mejoría de que en este caso si se toma en cuenta el estado de carga de los nodos vecinos a la hora de definir la ruta de los datos. Por otro lado, el proceso de ruteo implica una constante transmisión y petición del estado de los nodos mediante pequeños fragmentos de información, los cuales no significan un gran gasto de energía, pero esto significaría que la red estaría activa la mayor cantidad de tiempo, lo cual va contra las premisas subrayadas anteriormente.

En [6] se desarrolla Rumor Routing, el cual propone un ruteo estático dependiendo del evento al que se dispone a dar servicio. Esta idea no es aplicable al problema planteado, pues se pretende que todos los nodos sean capaces de atender todos los posibles eventos que se presente en el área de cobertura de la red, además de esta manera no se toma en cuenta la energía del siguiente nodo.

En [12] se presenta LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy), el cual maneja varias estaciones bases y estas no son estáticas, así se logra que cada nodo sea capaz de comunicarse directamente con alguna de ellas. En el sistema planteado no tiene cabida tener varios puestos de control, pues demandaría más recursos (una PC para cada uno). Por sus características este protocolo es sólo aplicable a redes con área de cobertura reducida.

En [21] se presenta SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation) en el cual, cuando un nodo presencia un evento se da, como su nombre lo dice, una negociación para seleccionar el destino. Como se muestra en la figura 5.3, en (a) el nodo fuente informa a sus vecinos que requiere transmitir. Estos evalúan si con sus recursos son capaces de dar el servicio requerido, en caso afirmativo responderán solicitando que se les envíe la información en (b) y finalmente la fuente enviará la misma a los vecinos que hayan cumplido con los requerimientos como se observa en (c).

La ineficiencia de este protocolo radica en que la información del evento podrá ser transmitida a más de uno de los vecinos, en el peor de los casos a todos, lo cual representaría un desperdicio de los recursos, pues en el paso siguiente habrá muchos nodos con los mismos datos y se daría redundancia en la información.

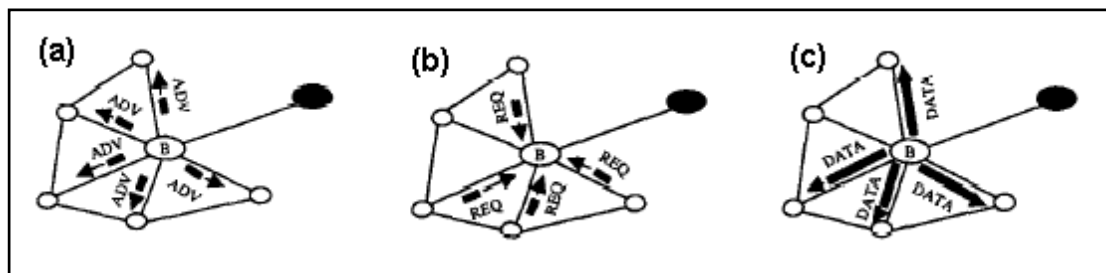


Figura 5.3 Descripción del funcionamiento de SPIN.¹¹

En [13] se expone un protocolo en el cual se considera que los nodos se encuentran en constante movimiento, sin embargo el ruteo no requiere saber la posición geográfica de los mismos. En esta propuesta, se hace un trabajo sencillo pero muy ingenioso: se consideran niveles lógicos, los cuales serán definidos por el alcance de transmisión de los componentes de la red.

¹¹ Tomado de [21].

Dentro de estos niveles lógicos, el punto de control estará en el nivel cero y se encargará de enviar una petición de configuración, los nodos que la escuchen se asignarán en un nivel uno, estos a su vez repetirán la acción y los siguientes estarán en el nivel dos y así sucesivamente; este proceso se ilustra en la figura 5.4, como se observa en (a). En el caso de un nodo reciba esta petición de un nodo con nivel superior, no hará ningún cambio a su configuración. En cada paso de configuración cada nodo guarda la identidad de los nodos del nivel inferior con los que tiene conexión.

Para atender un evento, el nodo que lo presencié enviará una solicitud de estado a los vecinos del nivel inferior, los cuales responderán enviando el estado de su batería y basándose en esta información la fuente seleccionará al más apropiado para retransmitir los datos. Este proceso se repetirá de nivel en nivel, hasta llegar al cero, o sea, al punto de control. En la figura 5.4 en (b) se ilustra este proceso, las líneas continuas representan la ruta que sigue la información, mientras que las discontinuas representan la conexión con los nodos que, debido al estado de su carga, no fueron seleccionados para el retransmitir.

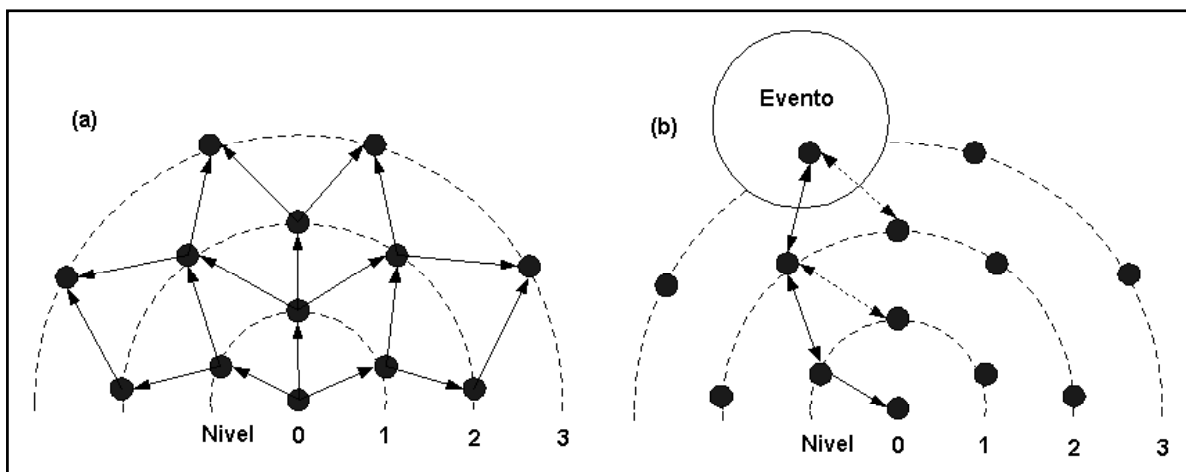


Figura 5.4 Descripción del funcionamiento del protocolo en [13].

Debido a que este protocolo fue concebido para redes móviles, requiere que el proceso de configuración de la red se ejecute de forma periódica, esto representaría una gran desventaja, pues significaría un gran gasto de energía en toda la red. A pesar de esto, debido a la poca cantidad de datos requeridos y sencillez de los algoritmos para realizar el ruteo, se decidió basar la solución para el protocolo de la red de este proyecto en esta propuesta.

En el protocolo planteado en este proyecto se manejará la idea de crear niveles lógicos, los cuales serán definidos por el alcance que lleguen a tener los teledetectores creados por los otros grupos de trabajo. Estos niveles no podrán ser auto-configurables, pues el dispositivo de comunicación selecciona el destino de los datos mediante una dirección MAC y esto implicaría que cada nodo tenga en su memoria las direcciones de cada uno de los componentes de la red. Evitando esto, se realizará una pre-configuración de la red, en esta etapa se guardará la ubicación geográfica de los componentes de red en el punto de control y se asignarán las conexiones en cada punto. Cada nodo monitoreará el estado de su carga y mediante esta información se decidirá el ruteo de los datos en la red. Además, la red permanecerá “dormida” hasta que se active alguno de los teledetectores en el área de cobertura de la misma.

Cuando se genere un evento, este será notificado por todos los nodos que lo presenciaron, ya que asimismo, en lugar de generar redundancia, permitirá que en el punto de control se determine más certeramente el lugar geográfico dónde se está dando la actividad detectada. Además, procurando responder a un posible fallo, cada nodo tendrá la capacidad de comunicarse con sus vecinos del mismo nivel, en caso de que los del nivel inferior no le respondan por encontrarse dañados o con muy poco nivel de carga.

Actualmente existe un grupo de trabajo del IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) que se encuentra desarrollando el IEEE 1451 Sensor Networks, el cual es un estándar aplicable estrictamente para redes inalámbricas de sensores, en el cual se especificarán los detalles para el diseño y construcción de este tipo de sistemas y deberá ser tomado en cuenta cuando se llegue a integrar el trabajo de los diferentes frentes de investigación involucrados en la consecución de la meta de este proyecto.

Desde el punto de vista de redes informáticas, la solución planteada en este proyecto cuenta con muchas características de una Red Inalámbrica de Área Personal de Bajo Ancho de Banda (LR-WPAN, por sus siglas en inglés). Por esta razón, se revisó el estándar IEEE 802.15.4 Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs).

Estas son las características principales de la solución planteada en este trabajo, los detalles de la misma y sus alcances serán explicados en las secciones siguientes.

5.2 Descripción del hardware

Como se explicó en la descripción del problema, la premisa principal la red es el bajo consumo y ahorro de la energía. Por esta razón para la creación del hardware debe involucrar la menor cantidad de componentes, procurando así cumplir con esta premisa. La actividad de la red que tendrá el mayor costo energético será la transmisión de los datos, lo cual le da vital importancia al módulo de comunicación. Dado esto, se dedicará un pequeño apartado a explicar las razones involucradas en la selección del dispositivo de comunicación utilizado y las ventajas que este ofrece.

5.2.1 Dispositivo de comunicación

Para la selección de este componente se realizó una búsqueda en Internet para determinar cuales son las ofertas del mercado internacional en cuanto a transceptores de radio frecuencia (RF), ya que en el ámbito nacional no existe un distribuidor de los mismos y menos un fabricante. Esta se realizó basándose en los requerimientos del sistema y algunos supuestos basados en las metas trazadas para los otros grupos de trabajo. Las características tomadas en cuenta en esta búsqueda se detallan a continuación.

Voltaje de alimentación y consumo de potencia mínimos: el módulo de alimentación de cada nodo apenas se encuentra en etapa de desarrollo, sin embargo se prevé que este no será capaz de otorgar voltajes muy elevados y también estará limitado en la entrega de potencia.

Rango de alcance: este será definido por la distancia de cobertura que logren alcanzar los teledetectores creados, los cuales han alcanzado un máximo de 150 metros, pero se espera que esta cifra sea incrementada. Procurando cumplir con las expectativas de estos circuitos, se determinó un mínimo de mil metros, el cual es un valor muy ambicioso, pero nos asegura llegar a cubrir las necesidades futuras.

Resistencia al medio: el producto final de este proyecto será instalado en los bosques de nuestro país, en los cuales se verá expuesto a condiciones muy variables de temperatura y humedad, por esta razón se requiere contar con la mayor flexibilidad y óptima operación ante estas variaciones.

Precio: a pesar de que no es una variable técnica, esta influye mucho en la viabilidad del proyecto. Debido a que este no persigue fines de lucro, es necesario que este sea lo más barato posible.

Los resultados de la búsqueda están resumidos en la tabla 5.1, en la cual se presenta los diferentes dispositivos de radio frecuencia con sus características. Los valores de distancia mostrados son los dados a línea vista, ya que este es el dato otorgado por todos los fabricantes.

Primeramente se descartó los componentes que no tenían el alcance requerido, esto nos dejó solamente dos rangos de frecuencia a escoger: 900 MHz y 2.4 GHz. Los sistemas que trabajan a 2.4 GHz tienen un gran desempeño cuando existe línea vista, sin embargo, son muy propensos a tener grandes pérdidas en ambientes con obstáculos; debido a esto se decidió descartarlos. Finalmente, quedan tres posibilidades, de las cuales dos son del mismo fabricante, por esto tienen propiedades muy similares, y una tercera que tiene un precio casi cuatro veces mayor a cualquiera de los otros tres, por lo cual no fue tomada en cuenta. Quedando solamente el AC4490-200 y el AC4490 – 1000M, se optó escoger este último para la implementación del sistema propuesto, debido a que este presenta un mayor alcance. Hay que recalcar que en el bosque se dará mucha atenuación debido a reflexión, refracción y difracción de la señal, pues habrá muchos obstáculos entre un punto y otro, de esta manera se procura que los 32 Km con los que cuenta el dispositivo a línea vista sean suficientes para cumplir la meta de mil metros planteada para el bosque.

Tabla 5.1 Características de los dispositivos de comunicación que ofrece el mercado.

Dispositivo	Frecuencia	V _{in} (V)	Consumo			Alcance	Temp. (C)	Hume.	Precio (\$)
			Trans.	Recep.	Idle				
24XStream	2.4 -2.48 GHz	5	150 mA	50 mA	26 uA	11 Km	0 - 70		95
AC4490-200	902 – 928 MHz	3.3 - 6	106 mA	30 mA	19 mA	6.5 Km	0-80	0 - 90	53,5
AC4486-5	869.7 –870 MHz	3.3 - 6	40 mA	30 mA	19 mA	914 m	0-80	0 - 90	53,5
AC4490-1000	902 – 928 MHz	3.3–5.5	985 mA	30 mA	19 mA	32 Km	0-80	0 - 90	67,5
FM 433MHz Narrow Band T7/R7	433MHz	5	7 mA	7 mA		600 m	0-55		98
TX1/RX1-173.225 VHF Long Range	173.225 - 173.250MHz	2.2 - 12	9.5 mA	14 mA		500 - 1Km			95
RX/TX303AT - RX/TX315AT RX/TX418AT - RX/TX433AT	303 - 315 - 418 - 433 MHz	2.8 - 3.3	10 mA	10 mA		375 m	0-70		38
Compact RFTM900	902 - 928 MHz	5	231 mA	85 mA	1.5 mA	32 Km	0-70		250
Linksys WAP11	2,4 GHz	12	950 mA			1,6 Km	0-70		70

El transceptor AC4490 – 1000M se muestra en la figura 5.5 y es fabricado por la empresa Aerocomm.

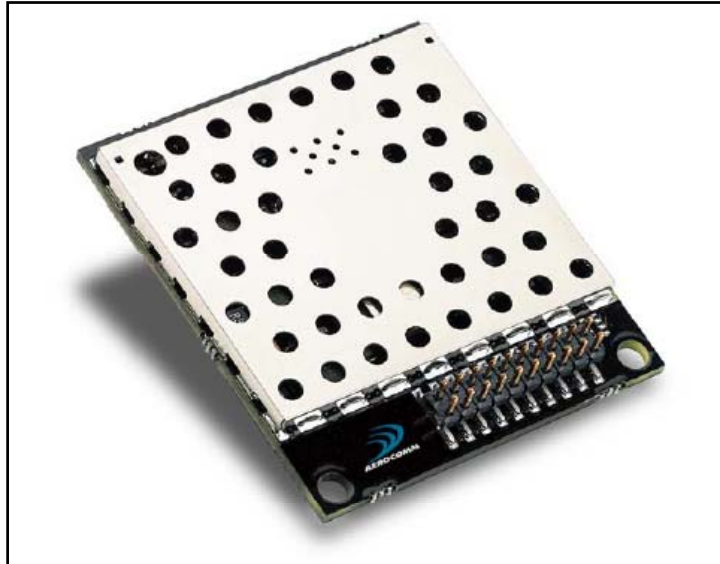


Figura 5.5 Dispositivo de comunicación utilizado: AC4490 – 1000M.¹²

Este componente es alimentado con 3.3 V, lo cual es favorable para el futuro módulo de alimentación de los nodos. Su consumo de potencia es variable, puesto que posee un registro de 8 bits donde permite ajustar la potencia de salida de transmisión; trabajando a un 10% consume 126 mA, mientras que al máximo requiere 985 mA. Su rango de temperatura en operación va de -40°C a 80°C y el de humedad abarca de 10% a 90%, lo cual cubre las posibles variaciones que se presentan en los bosques nacionales. Sus dimensiones físicas y peso son muy pequeños, lo cual lo hace bastante flexible para aplicaciones móviles. Utiliza comunicación serial con el protocolo RS232 para comunicarse con el controlador y modulación FHSS para su transmisión de radio frecuencia. Esta última ofrece varias ventajas, pues el sistema FHSS es casi inmune al ruido, las reflexiones, otras estaciones de radio o factores ambientales.

¹² Tomado del manual de usuario de AC4490 – 1000M.

El AC4490 – 1000M viene con un conector MMCX para la antena, el proveedor de este ofreció con este la antena S467FL-L-RMM-915S, la cual se ajusta a este tipo de conector. Esta es un dipolo de media onda y tiene una ganancia de 2 dBi. El transceptor tiene una potencia de salida típica de 743 mW y con este valor y la fórmula 3.4 se tendrá un EIRP de 1178 mW.

Un punto importante es el funcionamiento de este dispositivo en redes, en la figura 5.6 se muestran dos de las arquitecturas que soporta este, las cuales son de interés para una posible solución. La mayoría de las RIS están basadas en arquitecturas Punto a Punto y Multipunto-Multipunto, esta última fue la seleccionada para la solución, como veremos más adelante.

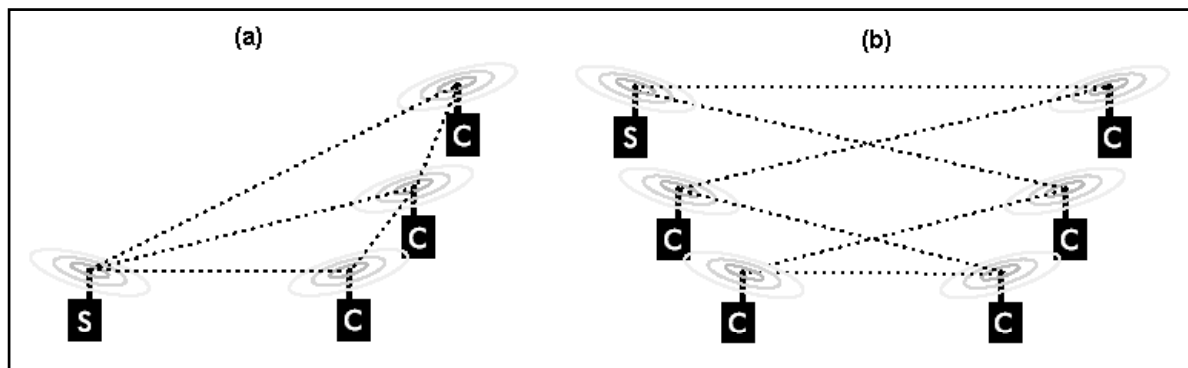


Figura 5.6 Arquitecturas soportadas por el transceptor. (a) Punto a Punto, (b) Multipunto-Multipunto.¹³

En un sistema Multipunto-Multipunto, todos los nodos tienen la posibilidad de comunicarse con cualquiera de sus vecinos, en el caso de la red planteada esto se logrará mediante la utilización de direcciones MAC, lo cual es otra facilidad del dispositivo seleccionado. Estas direcciones están compuestas de 6 bytes, de los cuales, los tres más significativos son estáticos dados por el proveedor y los tres restantes serán los utilizados para la selección del destino de los datos.

¹³ Tomado de las hojas de datos del AC4490 – 1000M.

La incorporación de direcciones MAC en el sistema, trajo consigo la incorporación del IEEE 802.15.4, el cual regula las LR-WPANs. A pesar de que este estándar no está enfocado a redes inalámbricas de sensores, el tipo de redes que regula presentan características muy similares a las del sistema en desarrollo. Los requerimientos de este estándar que se tomaron en cuenta son los siguientes:

- Tazas de transmisión de 250 kb/s, 40 kb/s, y 20 kb/s.
- Soporte de topologías de estrella y Punto-Punto.
- Direcciones asignadas de 16 y 64 bits.
- Asignación garantizada de muestras de tiempo.
- Bajo consumo de potencia.
- Detección de energía.
- Indicación de la calidad de la conexión.
- Diez canales en la banda de 915 MHz.

La mayoría de estos están contemplados en el dispositivo de comunicación utilizado, que a pesar de tratarse de una solución propietaria del fabricante, puede ser aplicable al estándar. Este se utilizó como base para la creación de la capa de red propuesta.

El AC4490 – 1000M cuenta con un conector de 20 pines para su interacción con un controlador, en la tabla 5.2 se muestra las diferentes señales que fueron utilizadas. En las patillas 2, 3, 7 y 8 se encuentran las señales necesarias para la comunicación serie con el protocolo RS232. Los pines 5, 10, 11 y 16 sirven para alimentar el circuito.

Tabla 5.2 Especificación de las señales del AC4490 – 1000M utilizadas.¹⁴

Patilla	Nombre	Función
2	TXD	Envío de datos vía puerto serie
3	RXD	Recepción de datos vía puerto serie
5	GND	Tierra
7	CTS	Se activa cuando el transceptor está listo para recibir datos en el puerto serie
8	RTS	Informa si el microcontrolador está listo para aceptar datos
10	V _{cc1}	Alimentación 3,3 V
11	V _{cc2}	Alimentación 3,3 V
15	UP_RESET	Señal de reinicio en alto
16	GND	Tierra
17	Command/ Data	Le informa al transceptor si le envían comandos o datos
20	IN_RANGE	Indica si se encuentra en rango de transmisión

Una señal de importancia será Command/Data, ya que esta permite que el transceptor interprete la información que le envía el controlador como un dato a transmitir o como comando de configuración, para así lograr variar el comportamiento del mismo en tiempo real.

La señal de UP_RESET, permitirá reiniciar el sistema cada vez que se detecte un mal funcionamiento y, por último, IN_RANGE informará cuando existe conexión entre el nodo y alguno de sus vecinos.

¹⁴ Tomado del manual de usuario del AC4490 – 1000M.

5.2.2 Nodo de la red

Como se mostró en la figura 5.1, el nodo de la red estará conformado por varios módulos, a continuación se explicará con más detalle como está compuesto cada uno de estos

5.2.2.1 Módulo de adquisición de datos

Este será conformado por los teledetectores de disparos, fuego y motosierras creados para la red, sin embargo, todos estos se encuentran aún en etapa de desarrollo por sus respectivos grupos de trabajo. Por esta razón estos módulos serán simulados por software.

5.2.2.2 Módulo de alimentación

Este también se encuentra en desarrollo, por lo que para el presente sistema se debió de implementar de manera provisional. Un módulo de alimentación básico contará con una fuente de poder y un dispositivo de rectificación o regulación. El primero será constituido por un banco de cuatro baterías AA recargables de Ni-MH (Níquel Metal Hidrido), las cuales son capaces de entregar hasta 2000 mAh, lo cual supera los 985 mA que puede llegar a pedir el transceptor a máxima potencia de salida. Este banco provee 5.5 V recién cargado, por lo cual es necesario un regulador para otorgar los 3.3 V requeridos.

Dado que el AC4490 – 1000Mm trabaja a 3.3 V se decidió utilizar un regulador LM3940, el cual tiene un voltaje de salida de 3.3 V y requiere un mínimo de 5 V en la entrada. El circuito de implementación de este componente se muestra en la figura 5.7, como se observa sólo requiere de un capacitor en la entrada y salida para su funcionamiento. Puede manejar corrientes de carga de hasta 1 A sin necesidad de un disipador, dado que la aplicación del sistema no sobrepasará esta carga, no se requerirá el uso de un disipador.

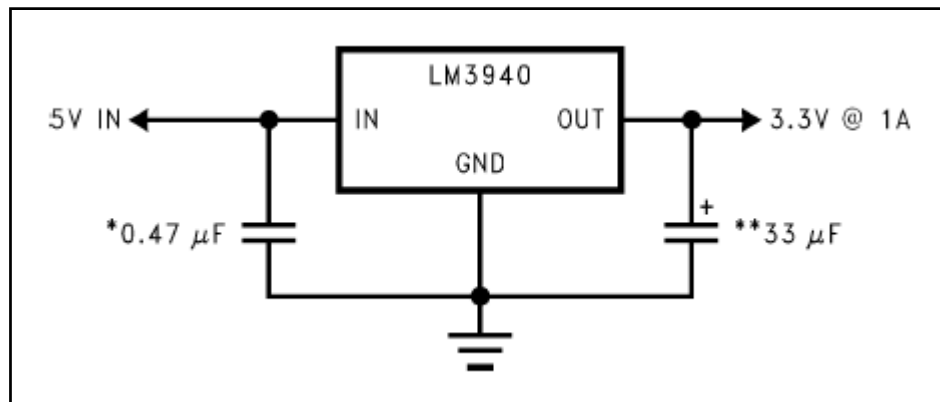


Figura 5.7 Circuito básico de operación del regulador LM3940.¹⁵

En su circuito interno presenta protección contra corto circuitos, lo cual brinda mayor seguridad para el circuito. Además su rango de temperatura de operación abarca desde los -40°C hasta los 125°C , lo cual cubre en sobremanera las posibles variaciones que se presentan en los bosques de nuestro país.

5.2.2.3 Módulo de procesamiento

El dispositivo de procesamiento estará compuesto por un microcontrolador, el cual debe cumplir con dos requerimientos básicos, debe poder operar a un nivel de voltaje de 3.3 V y debe tener posibilidad de comunicación vía puerto serie con protocolo RS232. Dado que se cuenta con experiencia utilizando microcontroladores de la marca Microchip, se decidió seleccionar uno de estos. Este fabricante cuenta con la serie L, los cuales trabajan a bajo voltaje, hasta 2 V, por lo que los 3.3 V serán más que suficientes para lograr su funcionamiento, además tiene un consumo de corriente típico de 10 mA, lo cual es un valor pequeño, lo cual es consecuente con el bajo consumo de potencia, tomando en cuenta que este dispositivo no podrá ser apagado. La mayoría de integrantes de esta serie poseen un puerto serie que trabaja con el protocolo RS232 a diferentes velocidades.

¹⁵ Tomado de las hojas de datos del LM3940.

Buscando tener suficientes recursos de memoria, tanto de programa como para datos se seleccionó el PIC16LF874A, el cual cuenta con 192 bytes de memoria de datos y 4K (14 bits words) de memoria de programa, valores que serán suficientes para albergar un protocolo de comunicación sencillo. El diagrama de pines de este PIC se muestra en la figura 5.8. Esta serie de microcontroladores tienen una restricción en cuanto a su frecuencia de operación, la cual no puede exceder los 10 MHz, por esta razón se decidió utilizar un cristal para 8 MHz para este efecto.

Ciertamente este componente ofrece muchas otras más herramientas de las que este proyecto demanda y no se pretende que estas sean desperdiciadas, más bien se espera que estas sean utilizadas por los otros módulos del sistema. Asimismo se proyecta que unidad de control de la alimentación utilice tanto los convertidores Analógico – Digital (ADC) y moduladores de ancho de pulso (PWM) para administrar los recursos energéticos del sistema. También, cabe la posibilidad que para la detección de fuego se utilice análisis digital de imágenes, de esta forma las rutinas y datos necesarios para este proceso podrán ser albergados en las partes de memoria no utilizada por el programa desarrollado para este proyecto.

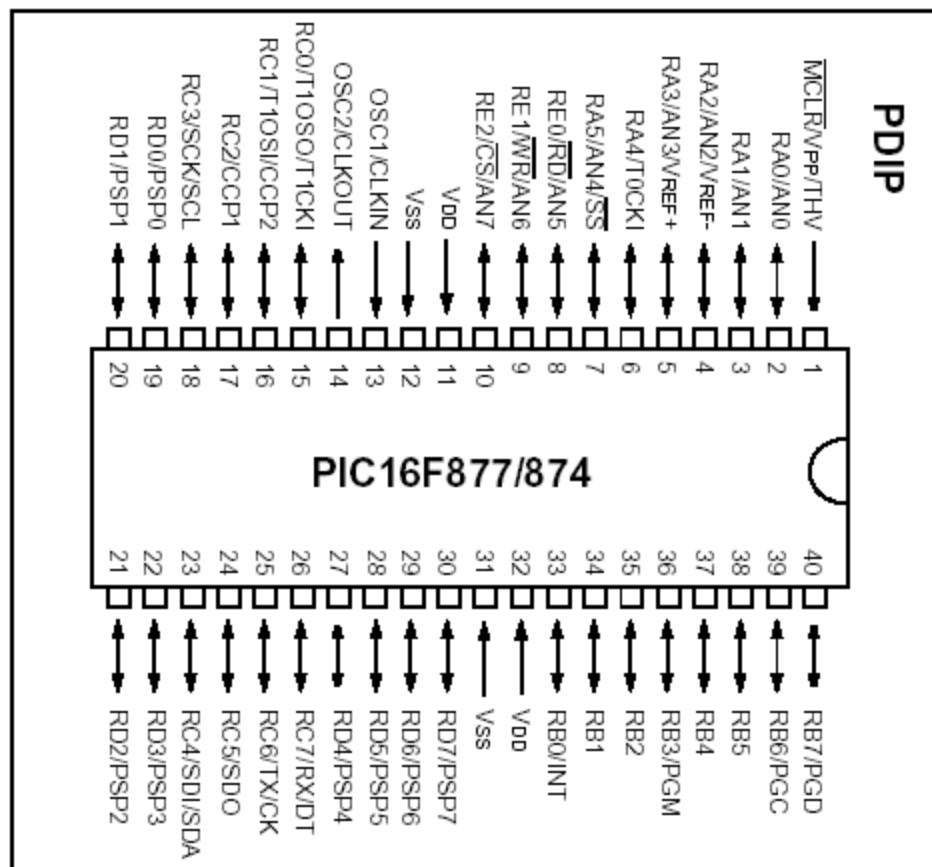


Figura 5.8 Diagrama de pines del PIC16LF874A.¹⁶

Además, este microcontrolador ofrece 33 pines configurables como entrada-salida, de los cuales sólo será necesario utilizar 8 para completar la interfaz con el transceptor. Con estos pines se gobernarán las señales de configuración y funcionamiento del AC4490 – 1000M y las señales necesarias para la comunicación por el protocolo de comunicación RS232.

¹⁶ Tomado de las hojas de datos del PIC16LF874A.

5.2.2.4 Módulo de comunicación

Este será el encargado de transmitir y recibir los datos en cada punto de la red, estará conformado por el dispositivo de comunicación y su respectiva antena, los cuales fueron detallados en 5.2.1. Este módulo se comunicará con el de procesamiento por medio de interfaz RS232, como se muestra en la figura 5.9.

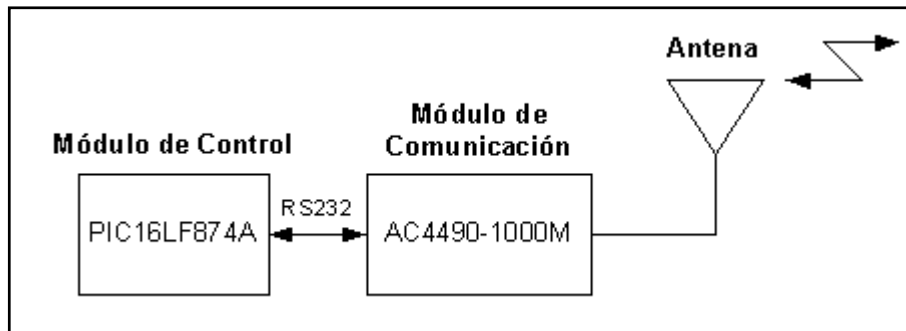


Figura 5.9 Interfaz entre el módulo de control y comunicación.

5.2.2.5 Circuito final nodo de red

Habiendo explicado cada uno de los componentes que integran los diferentes módulos que conforman el nodo de la red, en la figura 5.10 se muestra el diagrama de conexión de todos los componentes. En este se muestra el AC4490 - 1000M, solamente por su conector.

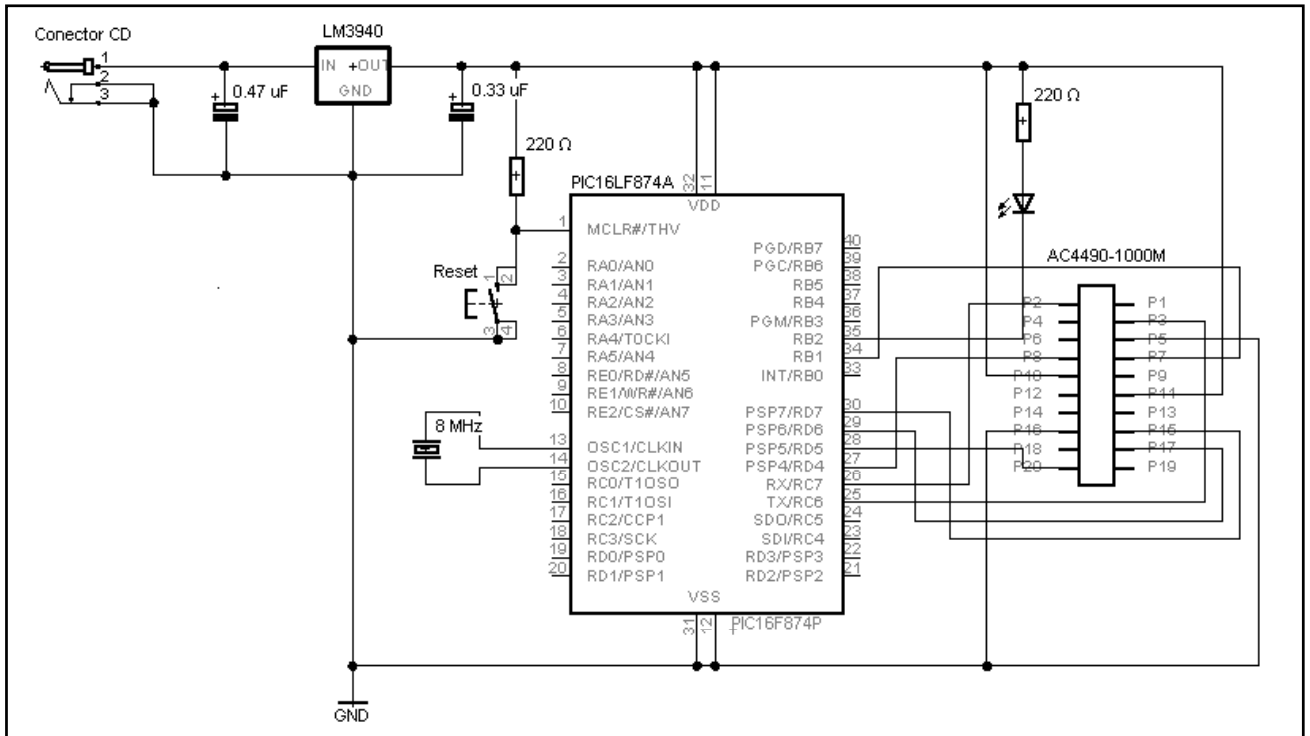


Figura 5.10 Diagrama de conexión para el circuito del nodo de la red.

En este diagrama se agregan dos instancias más, de las que no se ha hablado. Primero, un botón de reinicio del sistema, este está conectado a la patilla MCLR del PIC16LF874, para poder reiniciar el sistema si se detecta un error o comportamiento indebido del mismo. Segundo, se conecto un led en la salida RB2 del puerto B del microcontrolador, este es para uso meramente de pruebas, pues es la única interfaz entre el programa y el programador, para lograr comprobar el correcto funcionamiento en algunos tramos del mismo. Esta segunda deberá ser quitada del producto final de comunicación, pues el control de este involucra un gasto innecesario de energía en el nodo.

El diagrama en la figura 5.10 fue el utilizado para crear la placa impresa para la implementación de cada nodo de la red. El negativo para este impreso se muestra en el apéndice A.3.1 y fue creado en la herramienta Eagle. Para la concepción de esta placa, se contó con la ayuda del técnico Ronald Soto, quien también colaboró para soldar los componentes a la misma. Se crearon ocho placas, por lo cual las pruebas de campo se realizaron con ocho nodos.

5.2.3 Estación base

Con la misma sencillez con que se creó el circuito para cada nodo de la red se concibió el hardware para la estación base. En la figura 5.11 se muestra el diagrama de bloques para la estación base y de igual manera se detallará un poco más en cada uno de los módulos que lo conforman.

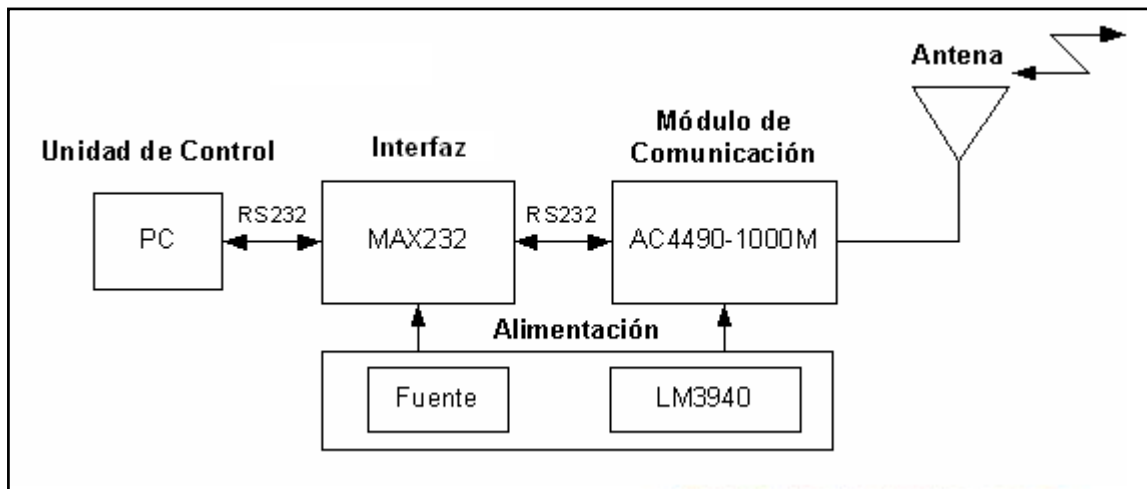


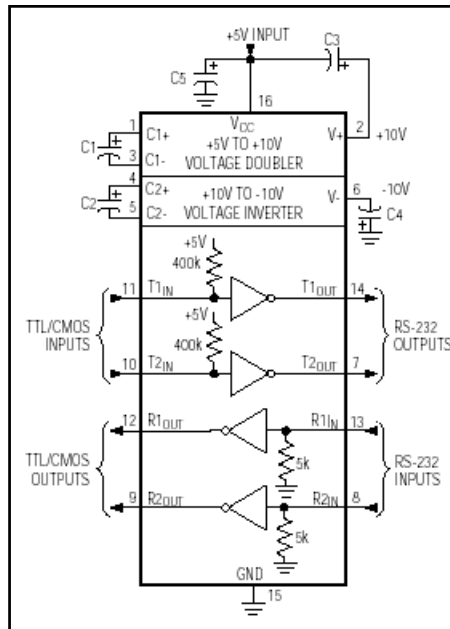
Figura 5.11 Diagrama de bloques de la estación base con los componentes que la componen.

5.2.3.1 Módulo de alimentación

Para este módulo será necesario tener una fuente de poder y un regulador de voltaje. Al igual que para el nodo, se utilizará un LM3940, ya que su voltaje de salida de 3.3 V es el ideal para el transceptor. Sin embargo, no se tendrá como fuente un banco de baterías. La estación base será alimentada mediante un transformador de 12 V con un conector de CD, esto permitirá conectarla a la red eléctrica pública.

5.2.3.2 Interfaz

La estación base estará conectada a una PC, donde se albergará el programa donde el usuario será capaz de observar los datos que se recolecten en cualquiera de los nodos de la red. Para realizar esta conexión es necesario convertir la señal del puerto serie del AC4490 – 1000M con un valor de 3.3 V a los 12 V a los que



trabaja el puerto serie de la computadora. Para lo anterior, será necesario la implementación de un convertidor de voltaje, como el MAX232, cuyo diagrama de conexión se muestra en la figura 5.12, en el cual se observa que este integrado necesitará de cinco capacitores para su funcionamiento, los cuales tendrán todos el mismo valor de 1 μ F.

Figura 5.12 Diagrama de conexión del MAX232.¹⁷

Dado que este componente posee la capacidad de convertir hasta cuatro señales, además de la conexión de Tx y Rx para cada puerto, se conectarán el CTS y RTS en ambos casos.

¹⁷ Tomado de las hojas de datos del MAX232.

5.2.3.3 Módulo de comunicación

Al igual que para el nodo, este módulo será conformado por el transceptor AC4490 – 1000M y su respectiva antena. Los detalles de estos fueron expuestos en el apartado 5.2.1.

5.2.2.4 Circuito final estación base

En la figura 5.13 se muestra el detalle de conexión de los componentes para la estación base de la red, en este el AC4490 – 1000M se denota sólo por su conector.

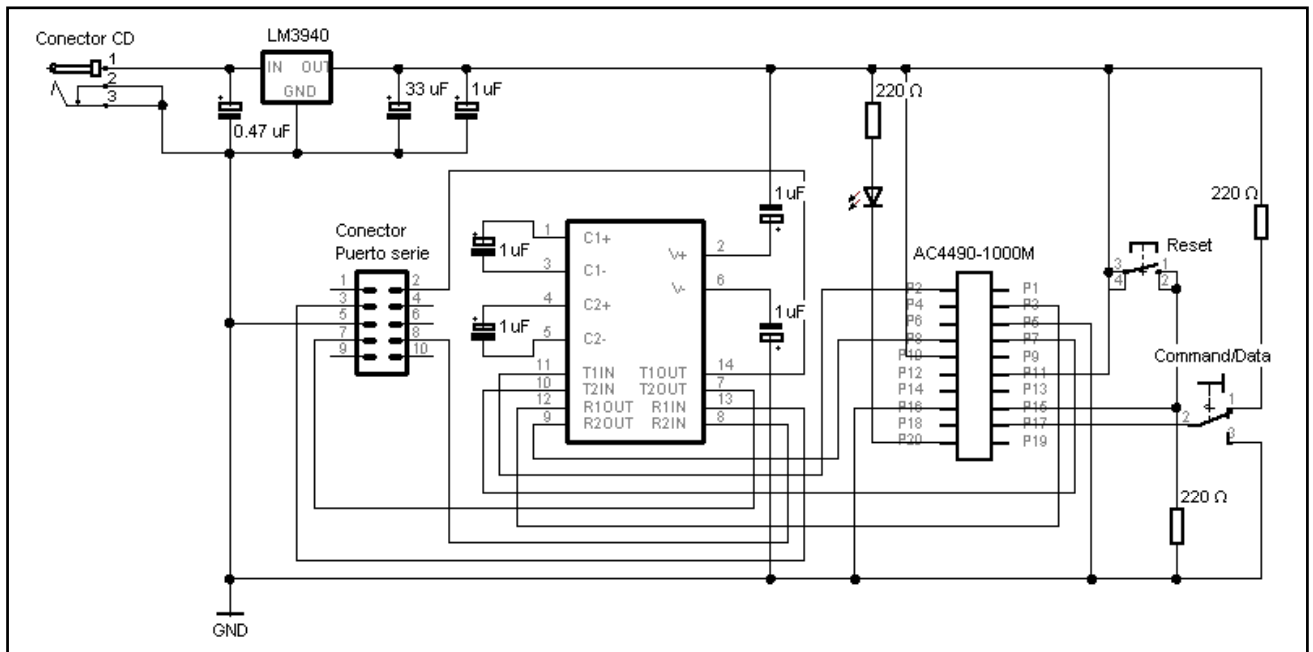


Figura 5.13 Diagrama de conexión para la estación base de la red.

En este diagrama se agregan tres elementos además de los mencionados anteriormente. Primero, la presencia de un led conectado a la al pin 20 del transceptor, este corresponde a la señal IN_RANGE, cuando esta señal este activa el led se encenderá, permitiendo así corroborar que existe conexión con los nodos vecinos. Segundo, existe un botón conectado a la señal UP_RESET, este permitirá reiniciar la interfaz de comunicación. Tercero, un botón para el manejo de la señal Command/Data, esto es meramente para realizar las pruebas de funcionamiento, pues con este se podrá reconfigurar el AC4490 – 1000M en tiempo real, principalmente para cambiar su dirección de destino.

De igual manera que para el nodo, el circuito del diagrama en la figura 5.13 fue plasmado en una placa impresa. En el apéndice A.3.2 se muestra el negativo que fue desarrollado en la herramienta Eagle. Nuevamente, con la ayuda del técnico Ronald Soto se creó dicha placa y se soldaron los componentes de la misma.

5.3 Descripción del software

En este apartado se explicará cada una de las rutinas desarrolladas para los diferentes programas creados. Parte primordial fue la concepción lógica de los protocolos de red implementados, por esto se dedicará un apartado para detallar más en ellos.

5.3.1 Protocolo de red

Como se mencionó anteriormente, para la creación de los protocolos de red se realizó una investigación la cual brindó varias soluciones para este apartado, sin embargo, por tratarse de una aplicación específica, ninguna de estas cubría todas las necesidades de la misma. Sin embargo estas se convirtieron en las bases para llegar a la solución planteada.

Dado que la información generada en la red siempre es enviada a un punto de control único, la topología física de la red será una estrella expandida. En la red planteada los nodos transmiten su información cada vez que es detectado un evento y ésta llega a todos los nodos que están en su rango de alcance, pero sólo el que posee la dirección MAC de destino es el que recoge los datos y responde. Por lo anterior la topología lógica de la red corresponde a Broadcast.

A continuación se detallará como se dará respuesta a cada una de las premisas que debe contemplar dicho protocolo.

Ahorro de energía: hay que recordar que todos los datos que se generen en la red tienen como destino final del punto de control, así es necesario lograr que el camino que estos sigan sea el más económico desde el punto de vista energético. Para lograr esto, se propone un ruteo dinámico basado en el estado de carga del siguiente nodo. De esta manera, cada nodo consultará a dos posibles retransmisores sobre su estado y de los que respondan, seleccionará al que en mejor condiciones se encuentre para enviar los datos.

Manejo de datos y algoritmos limitado: las memorias de programa y datos del microcontrolador están limitados, por esta razón se procurará el mínimo uso de estos recursos.

Para esto se utilizó la idea de concebir niveles lógicos en la red, como se muestra en la figura 5.4, estos estarán definidos por el rango de alcance de los futuros teledetectores, los cuales empezarán en la base con el nivel cero y se irá incrementando conforme se aumente la distancia. Cada nodo contará así con una identificación de red, la cual estará compuesta por dos datos, primero el número de su nivel y segundo su número de identificación dentro del nivel. Asimismo en cada nivel los nodos estarán numerados, lo cual permitirá reconocer de forma sencilla a sus vecinos. En este entendido, cuando se detecte un evento, los nodos sólo se comunicarán con sus vecinos del mismo nivel o con los pertenecientes al nivel inferior. Con esto los nodos no necesitan saber su ubicación geográfica, pues con su identificación de red conocen cuales nodos les son más cercanos. Esto también representa una disminución en el uso de algoritmos, pues los nodos no necesitan calcular la distancia a la que se encuentran sus vecinos.

La selección de la ruta se hace por el estado de carga, el cual es un dato del mismo formato. Al implementar esto en un programa es el equivalente a realizar una comparación, lo cual es muy simple para la unidad de procesamiento.

Integridad de la red: se pretende que la red diseñada esté libre de mantenimiento, por eso el protocolo debe ser capaz de reconfigurar la ruta en caso de que un nodo no posea energía suficiente para transmisión o se encuentre dañado. Como se mencionó anteriormente, los datos deben viajar de forma descendente por los niveles de la red, sin embargo en el caso que la conexión entre dos niveles esté dañada, los datos deben seguir otro camino hacia la estación base. De esta forma, en el caso que un nodo no encuentre respuesta en el nivel inferior, este acudirá a sus dos vecinos más cercanos del mismo nivel, los cuales se encargarán de intentar llevar la información al nivel inferior.

Dado que el sistema desarrollado utiliza direcciones MAC para seleccionar el destino de los datos, para el protocolo planteado se considerarán tres primitivas basadas en el estándar IEEE 802.15.4 presentado en [13], el cual abarca redes inalámbricas de bajo ancho de banda que utilizan este direccionamiento:

S_REQUEST (Status Request)

Esta se encargará de solicitar al nodo destino la información de su estado. En la figura 5.14 se muestra la conformación de la misma. Primeramente se envía el código de la primitiva, así el nodo que la recibe conoce que significan el resto de datos que recibirá. Luego viene la identificación de red del nodo fuente. Seguidamente se envía la dirección MAC del mismo, de esta manera el nodo destino sabrá a que dirección debe de contestar, finalmente se enviará nuevamente el código de la primitiva como medida para asegurar que los datos llegaron satisfactoriamente.

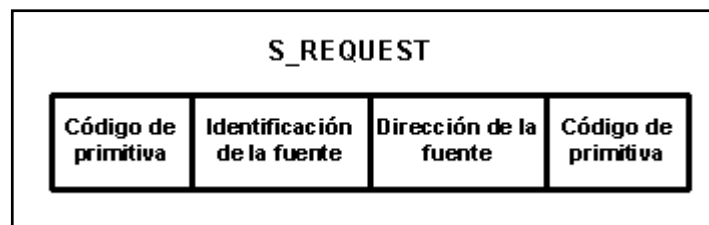


Figura 5.14 Descripción de la primitiva S_REQUEST.

Cada vez que se genera un S_REQUEST se dará un tiempo de espera para que llegue la información que se solicita al nodo destino, en caso de ser superado este tiempo se descartará la captura de estos datos y se procederá a solicitarse a otro nodo.

SEND_S (Send Status)

Esta será la respuesta para S_REQUEST. Una vez que un nodo recibe esta última, debe responder con la información de su estado. En la figura 5.15 se muestra como está conformada esta respuesta.

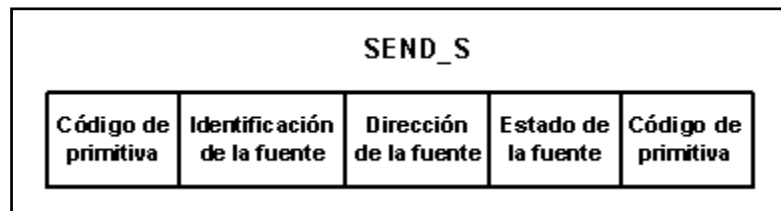


Figura 5.15 Descripción de la primitiva SEND_S.

Igual que en el caso anterior, se envía al inicio y final el código de la primitiva. Luego vienen la identificación de la red y su dirección MAC. Seguidamente se transmite la información del estado del nodo, en la cual va incluido el nivel de carga disponible.

RETRANS_R (Retransmit Request)

Esta solicita al nodo destino que se encargue de retransmitir la información que se le envía, en la figura 5.16 se muestra su simplicidad. Esta consta del envío de la información precedida y seguida del código para esta primitiva.

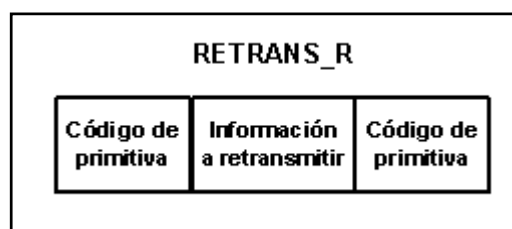


Figura 5.16 Descripción de la primitiva RETRANS_R.

Utilizando estas primitivas la red será capaz de llevar la información de un evento detectado por un nodo en un nivel n hasta la estación base que está situada en el nivel cero.

La forma en que se da servicio a la transmisión de información se muestra en la figura 5.17. Primero, en (a) el nodo que requiere enviar los datos envía un S_REQUEST a los dos nodos más próximos del nivel inferior. En caso de no obtener respuesta de alguno de ellos, hará la misma petición a los módulos vecinos del mismo nivel, como esto no se da en todas las oportunidades, en la figura se muestra con una línea discontinua.

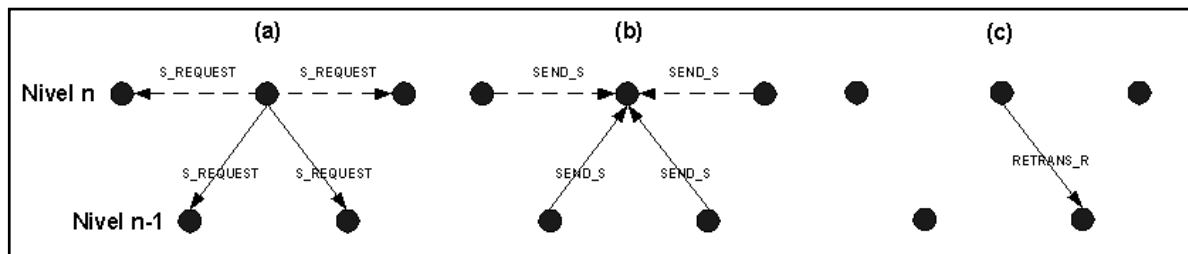


Figura 5.17 Secuencia para la atención de un evento por el protocolo creado.

Cada uno de los nodos que recibió S_REQUEST y que tenga la suficiente energía para la transmisión de datos, enviará a la fuente su estado mediante un SEND_S, como se muestra en (b).

Con la información recibida el nodo que presencié el evento selecciona la mejor opción, desde el punto de vista energético, para encargarse de retransmitir los datos. Asimismo se envía un RETRANS_R, como se muestra en (c)

Todo este proceso se repetirá en el nodo seleccionado y a su vez en el siguiente, hasta que los datos lleguen al nivel cero, o sea, el punto de control.

5.3.2 Software del microcontrolador y control del transceptor

Para el software del microcontrolador se utilizó la herramienta PICC. Esta permite crear código en instrucciones máquina del micro, que son de muy bajo nivel, en un ambiente de más alto nivel, como lo es C. Además, este compilador ofrece una serie de rutinas de configuración que facilitan el uso de los recursos que ofrece el PIC16LF874A, ya que se necesitaría de una inversión considerable de tiempo y esfuerzos el crear los procedimientos que cumplan con las mismas funciones. También, PICC ofrece muchas facilidades para la comunicación serial, la cual será la interfaz que conecte el micro con el transceptor, permitiendo el uso de interrupciones para la recepción de los datos y procedimientos predefinidos para el envío de los mismos.

Para lograr una mejor comprensión del funcionamiento de programa para el PIC16LF874A, se separaron los procedimientos que lo conforman en rutinas de servicio y las propias del protocolo. Las primeras son realizan funciones generales, como envío de datos, control del transceptor y configuración de microcontrolador. Las segundas son la traducción del protocolo desarrollado al código de programación del micro.

Si se requiere tener más detalle de los procedimientos desarrollados para microcontrolador en el Apéndice A.2 se muestra el código fuente del mismo con su debida documentación.

5.3.2.1 Rutinas de servicio

RESET_H

Esta se encarga de hacer un reinicio por hardware al dispositivo de comunicación, esto se hace poniendo un uno lógico, durante 20 milisegundos, en la patilla RB7 que está conectada a la señal UP_RESET del AC4490 – 1000M.

ENV_TODO

Este procedimiento recibe un arreglo A y un número entero C, con esto se encarga de colocar en el puerto serie una cantidad C de los datos existentes en A.

SET_DEST

Este se encarga de cambiar la dirección de destino del transmisor, en la figura 5.18 se demuestra el diagrama de flujo de SET_DEST. Primeramente, mediante la manipulación de la señal Command/Data del AC4490 – 1000M se prepara el mismo para recibir comandos, luego se envían por el puerto serie el código de la función y luego los tres valores de la nueva dirección. Finalmente se vuelve el transceptor al modo de recepción de datos.

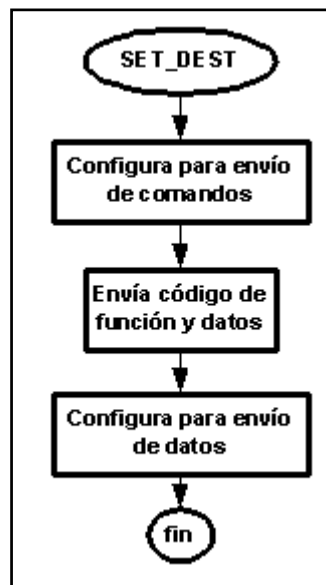


Figura 5.18 Diagrama de flujo de SET_DEST.

RDA_ISR

Esta da servicio a la interrupción de recepción del puerto. En la figura 5.19 se muestra el diagrama de flujo para RDA_ISR, esta compara cada dato recibido en el puerto serie y lo compara con los distintos códigos de instrucción de los protocolos de la red, cuando corresponde a uno de estos se encarga de recibir la información para función indicada y activa una señal para que se le dé servicio a la instrucción.

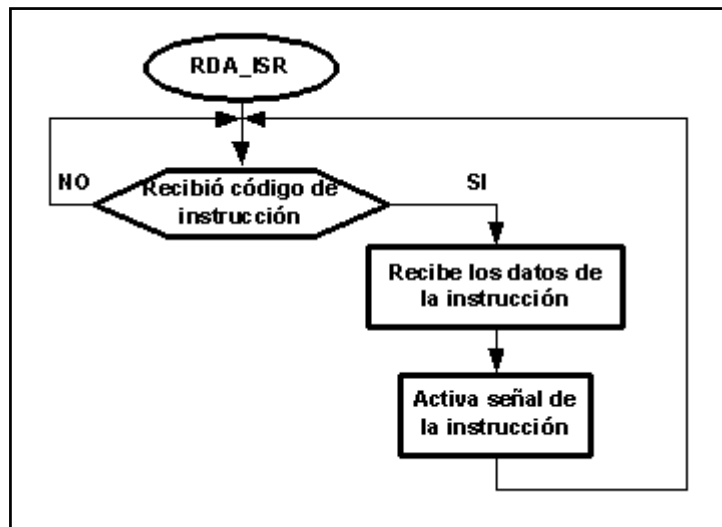


Figura 5.19 Diagrama de flujo de RDA_ISR.

MAIN

Este es el programa principal, este se encargará al inicio de configurar el microcontrolador y todos sus recursos, para este caso se definirán las variables del puerto serie y las diferentes entradas-salidas de los puertos utilizados. Este revisará constantemente si se activa alguna señal de instrucción y el caso de darse alguna se le dará servicio a la misma.

5.3.2.2 Rutinas del protocolo

STATUS_REQ

Esta se encarga de solicitar el estado de uno de los vecinos, como se muestra en el diagrama de flujo de la figura 5.20, primero se carga la dirección MAC del destino, esto se hace utilizando SET_DEST. Luego se ejecuta el equivalente de la primitiva S_REQUEST y por último se cae en un ciclo de mientras se aguarda por la información solicitada. En caso de superarse este tiempo de espera, se asume que este nodo está dañado o no tiene la suficiente energía para la transmisión.

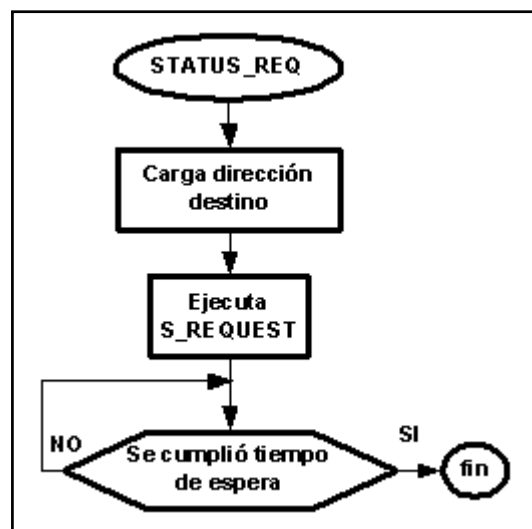


Figura 5.20 Diagrama de flujo de STATUS_REQ.

SEND_STATUS

Mediante esta, el nodo informa su estado al vecino que le solicitó estos datos. En el diagrama de la figura 5.21 se muestra que inicialmente se carga la dirección destino de estos datos, de igual manera utilizando SET_DEST. Luego se ejecuta el equivalente de la primitiva SEND_S.

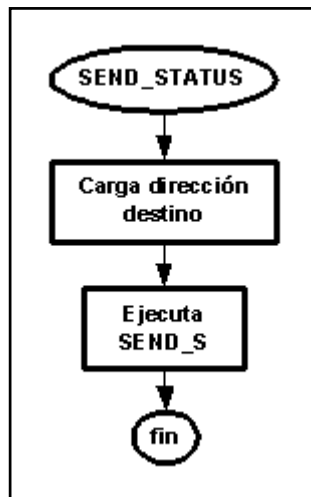


Figura 5.21 Diagrama de flujo de SEND_STATUS.

ASK_RETRANS

Esta se encarga de hacer una petición de retransmisión de datos al nodo vecino. Como se observa en la figura 5.22, este procedimiento consta sólo de la ejecución de RETRANS_R, la cual está detallada en la figura 5.16.

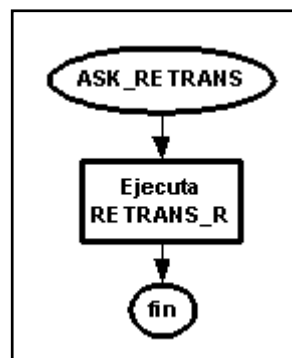


Figura 5.22 Diagrama de flujo de ASK_RETRANS.

REQUEST

Este procedimiento consta de un ciclo, el cual pretende obtener la información sobre el estado de los nodos vecinos, en la figura 5.23 se muestra el diagrama de flujo de la misma. Inicialmente se enviará un STATUS_REQ a los nodos más cercanos del nivel inferior, en el caso de que alguno de estos no responda la petición, esta será transmitida a los dos nodos vecinos del mismo nivel. Si tampoco se obtiene la información de estos dos, se dará un tiempo de espera y se reiniciara el ciclo. Este ciclo se acabará hasta que consiga la información de alguna de las cuatro opciones mencionadas, como se observa en la figura.

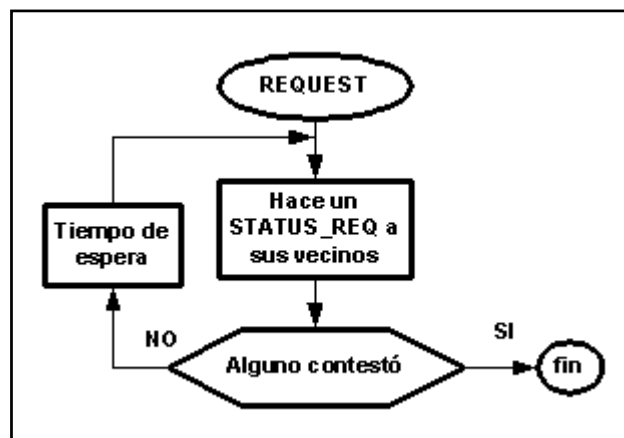


Figura 5.23 Diagrama de flujo de REQUEST.

5.3.3 Software del punto de control

El programa del punto de control fue desarrollado en Delphi, el cual es un lenguaje de alto nivel orientado a objetos, lo cual permite crear interfaces amigables con el usuario de forma muy sencilla. En la figura 5.24 se muestra la pantalla principal del mismo.

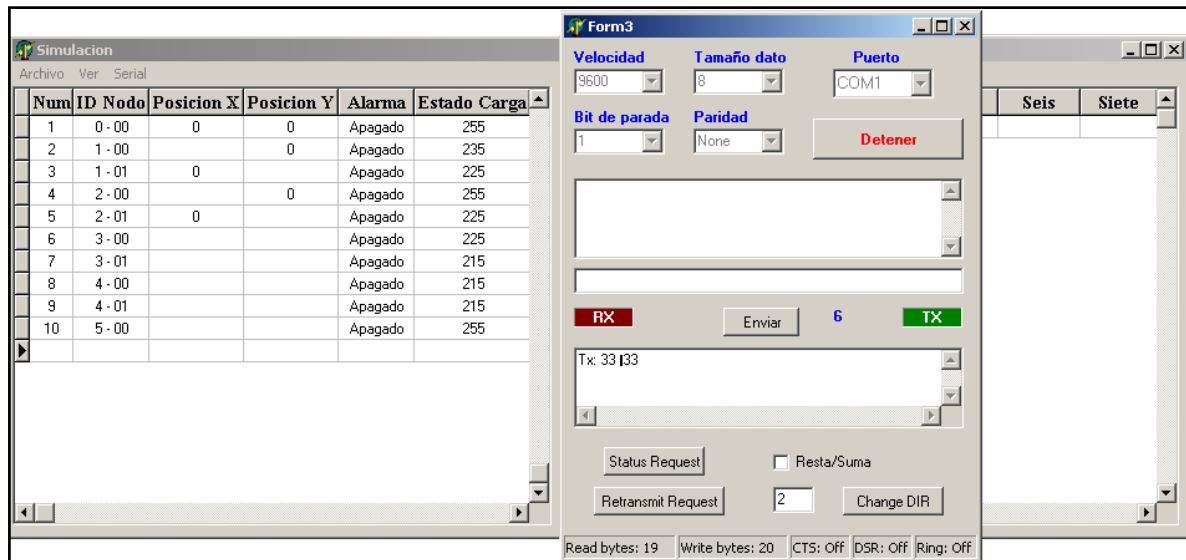


Figura 5.24 Pantalla principal del programa del punto de control.

En esta se controla la configuración del puerto serie y una vez que se activa este se echa en marcha el funcionamiento del sistema. Sin embargo, dado que este proyecto es un primer prototipo es necesario poder monitorear desde aquí el comportamiento de la red en general, por esto se cuenta con funciones extras para este cometido. Además, este programa se encarga de simular las posibles alarmas en los diferentes puntos de la red.

Mediante el botón “Change DIR” y la manipulación manual del interruptor que gobierna la entrada Command/Data del AC4490 – 1000M, se cambia la dirección de destino de la estación base.

Con el botón “Status Request” se ejecuta la primitiva S_REQUEST del protocolo y de esta manera se puede conocer el estado de cada nodo red.

Con el botón “Retransmit Request” se simula la primitiva RETRANS_R, con la cual el nodo que esté como destino en ese momento interpretará que se ha producido un evento en la red y empezará el ciclo de comunicación hasta la base.

Este programa maneja dos bases de datos, la primera contiene la información del estado de cada nodo, como se observa en la tabla 5.3. Estos datos se actualizan en tiempo real, para esto se agregó una pequeña rutina en el microcontrolador que se encarga de enviar a la base el estado del nodo cada vez que este participa en el proceso de ruteo cuando se produce un evento.

Tabla 5.3 Datos de los nodos en el programa de control.

	Num	ID Nodo	Posicion X	Posicion Y	Alarma	Estado Carga
▶	1	0-00	0	0	Apagado	255
	2	1-00	70	70	Apagado	225
	3	1-01	-70	70	Apagado	225
	4	2-00	70	170	Apagado	235
	5	2-01	-70	170	Apagado	235
	6	3-00	70	270	Apagado	245
	7	3-01	-70	270	Apagado	245
	8	4-00	70	370	Apagado	245
	9	4-01	-70	370	Apagado	245
	10	5-00	70	470	Apagado	255

Cada vez que un nodo participa en el ruteo, este es registrado en la segunda base de datos, la cual se muestra en la tabla 5.4, esta se encarga de llevar un control del camino que siguió la información y el estado virtual de la carga del nodo por el que pasaron los datos.

Tabla 5.4 Datos de la ruta que sigue la información a través de la red.

	Uno	Dos	Tres	Cuatro	Cinco	Seis	Siete
▶	4-01 / 245	3-00 / 245	2-00 / 245	1-00 / 245			
	4-01 / 235	3-00 / 235	2-01 / 245	1-01 / 245			
	4-01 / 225	3-00 / 225	2-00 / 235	1-00 / 235			
	4-01 / 215	3-01 / 215	2-01 / 235	1-01 / 235			

5.3.4 Software de simulación

Dado que realizar pruebas de campo con un número grande de nodos se requeriría de muchas personas involucradas, espacio físico, recursos económicos para la creación de muchos nodos, tiempo y demás complicaciones que esta acarrearía, se decidió crear un programa de simulación, el cual permita observar el comportamiento del protocolo desarrollado en una red mucho más numerosa. Dicha aplicación fue desarrollada en Delphi, utilizando bases de datos y procedimientos recursivos.

En la figura 5.25 se observa la pantalla principal de dicho programa. Se decidió agregar a este la posibilidad de simular otras formas de ruteo estático, para tener un marco de comparación del funcionamiento del diseñado en este proyecto.



Figura 5.25 Pantalla principal del programa de simulación.

Para comprender mejor el manejo de este programa, a continuación se detallará las funciones que cumple cada uno de sus componentes.

Cantidad de nodos: este permite seleccionar el número de nodos que tendrá la red a simular, se puede seleccionar desde 15 hasta 70.

Cargar: mediante este botón se establecen los valores iniciales para cada nodo. El programa se encargará de asignar a cada nodo un par de coordenadas para tener una ubicación en el espacio de los mismos, esta se realizará como se muestra en la figura 5.26. Hay que recordar que la solución propuesta involucra la idea de niveles, así se considera cada uno de ellos como un círculo alrededor de la estación base y se colocan los nodos sobre cada circunferencia.

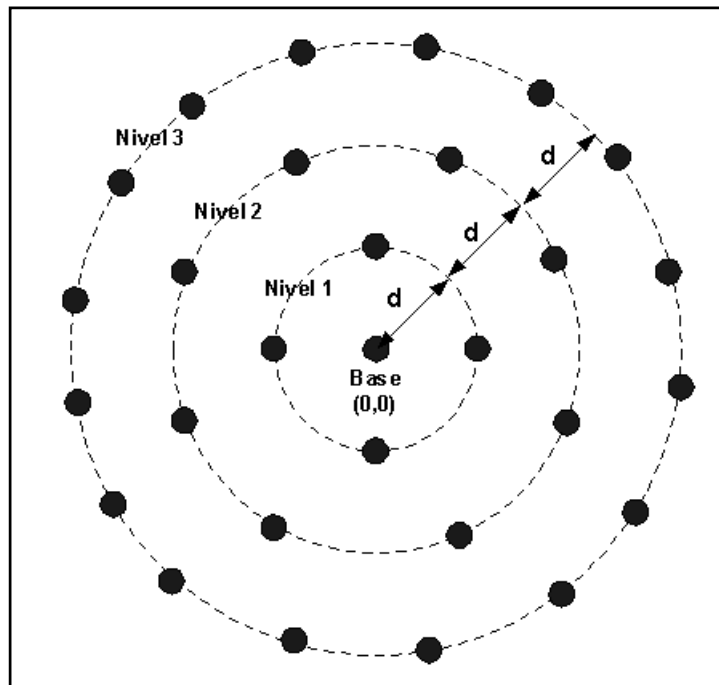


Figura 5.26 Ubicación de los nodos en el programa de simulación.

También, se asigna un estado de carga inicial de 100 % y se las conexiones de cada nodo con sus vecinos del mismo nivel y del nivel inferior. Una vez que la tabla esta llena puede empezar la simulación.

Simular: este botón inicia un ciclo, en el cual se dará una alarma virtual en cada uno de los nodos del nivel 2 y sus superiores. Con esto se pretende observar la respuesta ante una red muy activa.

Seleccionar: mediante este se selecciona un único nodo donde se quiere generar una alarma.

Solo uno: con este botón se ejecuta la atención del evento por el nodo seleccionado en *Seleccionar*.

Ruteo: en este se indica cual protocolo se simulará. En “Implementado” se correrá la rutina correspondiente al protocolo creado en este proyecto, el cual involucra un ruteo dinámico basado en el estado de carga de los nodos inferiores. En “Estático: sólo uno” se hace una variación, pues siempre se seleccionará el nodo primer nodo inferior para retransmitir los datos. Finalmente, en “Estático: ambos” se reenviará la información a ambos nodos inferiores. Con esto se pretende mostrar como el ruteo creado alarga la vida de la red. Para cada uno de estos se escribió una rutina recursiva

Capítulo 6: Análisis y resultados

6.1 Simulación

Con el programa de simulación se pretende observar el comportamiento de los protocolos desarrollados, enfatizando en los niveles de energía resultantes de los diferentes escenarios planteados. Además en este se puede trabajar con mayor cantidad de “nodos virtuales”, ya que la fabricación de grandes cantidades de nodos en la vida real conllevaría un gasto de tiempo y dinero muy elevado.

Todas las simulaciones realizadas se hicieron en una red de 60 nodos, en la cual todos inician con un estado de carga de 100 % y se encuentran configurados como se muestra en la figura 5.26. Dado este acomodo y la cantidad de nodos, existirá hasta el nivel cuatro lógico en todos los casos. Además, cada vez que un nodo participa en la ruta de la información, a este se le descontará un 2 % de su porcentaje de carga. Esta disminución del 2 % es meramente arbitraria, pues al no existir el módulo de alimentación, no es posible conocer realmente como afectará el proceso de envío de datos al estado de carga de cada nodo.

La primera prueba se hizo para comparar el desempeño del sistema de ruteo planteado, el cual es dinámico, ante uno estático. Para esto, se consideró que se diera una detección en cada nodo, empezando desde el segundo nivel hasta el cuarto. Hay que recordar que en el protocolo planteado cuando un nodo requiere transmitir información, este seleccionará entre los dos vecinos del nivel inferior el que tenga mejor estado en su carga. En el estático para la comparación, siempre se enviará la información a sus dos vecinos inferiores.

En la figura 6.1 se muestra gráficamente los resultados obtenidos al ejecutar el protocolo estático. Se observa como se demarcan los diferentes niveles. En el cuarto casi no se nota cambios en el estado de carga, pues sus componentes no participan en el ruteo y sólo sirven como fuentes. En el tercero, tampoco hay mucha

diferencia, pues estos nodos solamente le dan servicio a los del nivel superior. En el segundo nivel se da una caída considerable, hasta un 60 %, pues por estos recae darle servicio a todos los puntos de los dos niveles superiores. Finalmente, en el nivel más cercano a la base todos sus componentes están con la carga agotada. Esto indica que este protocolo no es eficiente desde el punto de vista energético.

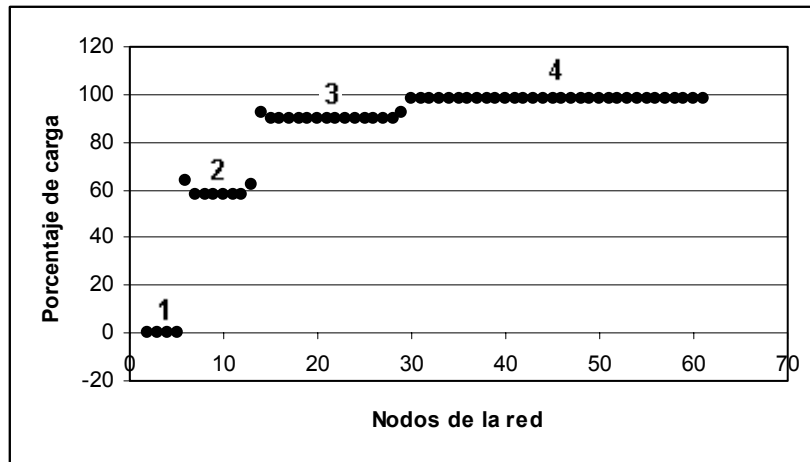


Figura 6.1 Resultados de la simulación para el protocolo estático.

Por otro lado, en la figura 6.2 se observa los resultados para el protocolo creado en este proyecto. Al igual que con el estático, en el nivel más alejado no se ve gran cambio. En el siguiente la diferencia mostrada es menos marcada que en la figura anterior. Para el segundo nivel, la carga aún se conserva arriba del 80 %

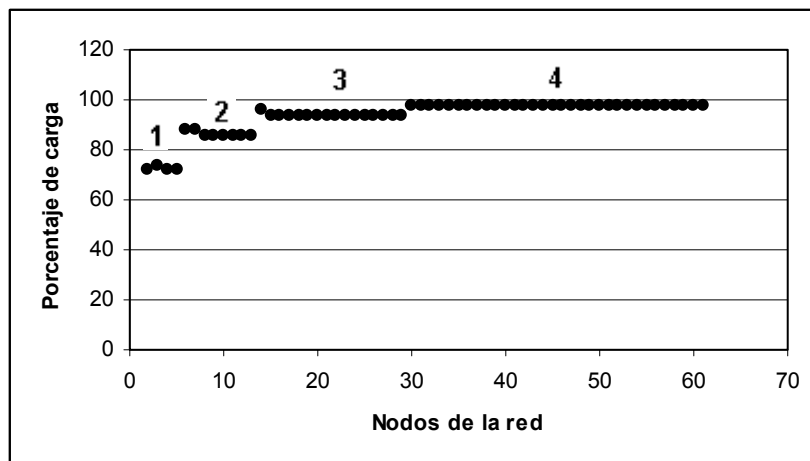


Figura 6.2 Resultados de la simulación para el protocolo propuesto.

En el nivel inferior hay una gran mejoría con respecto al caso anterior, pues aquí los nodos aun poseen más del 70 % de su carga. A pesar de que la red para la que se concibió este protocolo se espera que no tenga tanta actividad, con lo anterior se demuestra que un ruteo dinámico basado en el estado de carga de los nodos preserva mejor los recursos energéticos de la red.

En la segunda prueba realizada con este programa, también se hace una comparación con protocolos estáticos. En este caso se observa como se atiende varias veces un evento en un mismo nodo, asimismo se simularon veinte alarmas en un único nodo del nivel más exterior.

En este caso se usaron dos formas de ruteo estático. En el llamado “solo uno” la información será enviada siempre a un único nodo, por otro lado, en “ambos” los datos se retransmitirán a los dos posibles nodos inferiores.

En la figura 6.3 se muestran los resultados de las simulaciones para los protocolos estáticos. Para el caso de “solo uno” se da el mismo gasto energético en cada nivel, sin embargo, este se dará en un único nodo. Esto llegaría a ser contraproducente cuando se requiera utilizar este nodo en otro proceso de ruteo, pues sus recursos ya se encontrarían disminuidos.

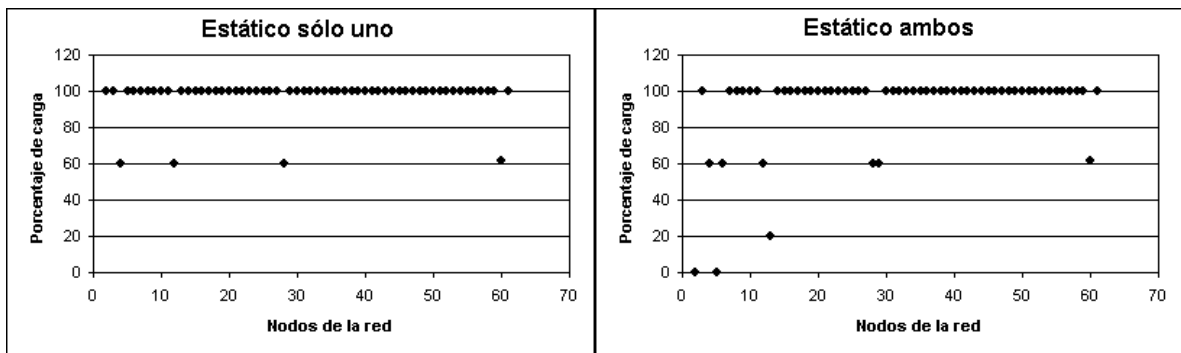


Figura 6.3 Resultados de la simulación para los protocolos estáticos.

Para el caso de “ambos” se observa como es mayor la cantidad de nodos involucrados en la transmisión de los datos. Sin embargo, alguno los que se encuentran más cerca de la estación base terminaron con un nivel carga muy bajo o cero, lo cual implica pérdida de conectividad en la red.

En el caso del protocolo desarrollado se observa en la figura 6.4 como conforme se avanza en los niveles hacia la base, se incrementa el número de nodos participantes en el ruteo de los datos. A diferencia del caso anterior, esto hace que el gasto realizado por cada nodo se disminuya, pues el gasto energético de cada nivel se reparte equitativamente entre los puntos del mismo que aparecen activos.

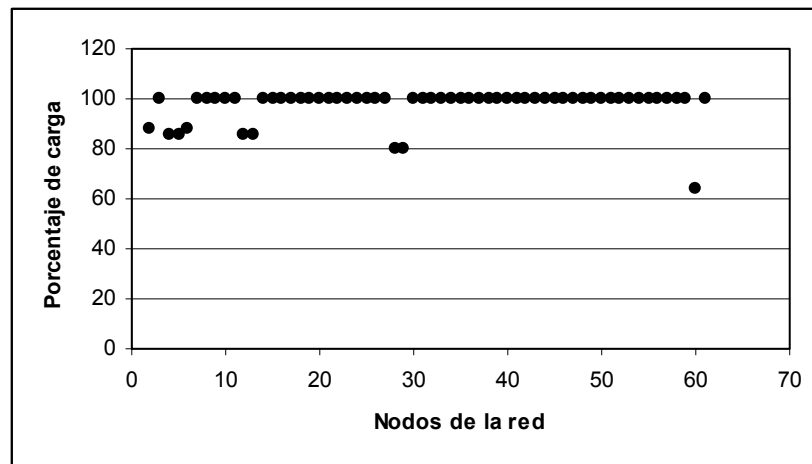


Figura 6.4 Resultados de la simulación para el protocolo desarrollado.

También se observa que todos los nodos involucrados, a excepción de la fuente de los eventos, poseen más del 80 % de su carga, lo cual los deja en buenas condiciones para aceptar nuevas peticiones de transmisión.

6.2 Pruebas de campo

Para la implementación del plan piloto se utilizó ocho nodos y una estación base. Estos fueron colocados en diferentes puntos del Campus central del Instituto Tecnológico, en la figura 6.5 se denota la ubicación de cada nodo con un punto rojo y la estación base con un punto negro sobre el mapa de la sede central.



Figura 6.5 Detalle de la ubicación de los nodos durante la prueba de campo.

Procurando comprobar el comportamiento de los niveles lógicos los nodos fueron configurados en cuatro de ellos, por lo que cada uno estará formado por dos dispositivos, como se muestra en su identificación de red.

Cada uno está ubicado a aproximadamente 100 m de sus vecinos del nivel inferior y los del nivel más superior se encuentra a unos 500 m de la base. Para hacer estas pruebas se agregó una pequeña rutina en el programa de microcontrolador, la cual se encarga de disminuir el estado de carga en cada nodo y luego enviar a la base esta información, cada vez que este participa en el proceso de transmisión de los datos.

De esta manera, la prueba también sirvió como prueba de distancia para los componentes, pues los nodos del nivel más alejado de la base se comunicaron directamente a la base, lo cual comprobó una correcta conexión a más de 500 m.

En la figura 6.6 se muestra la concepción lógica de los niveles y las conexiones para dicha prueba. Se observa la incorporación de un nodo 5-00, el cual será simulado desde el punto de control para iniciar siempre desde este el proceso de atención de eventos.

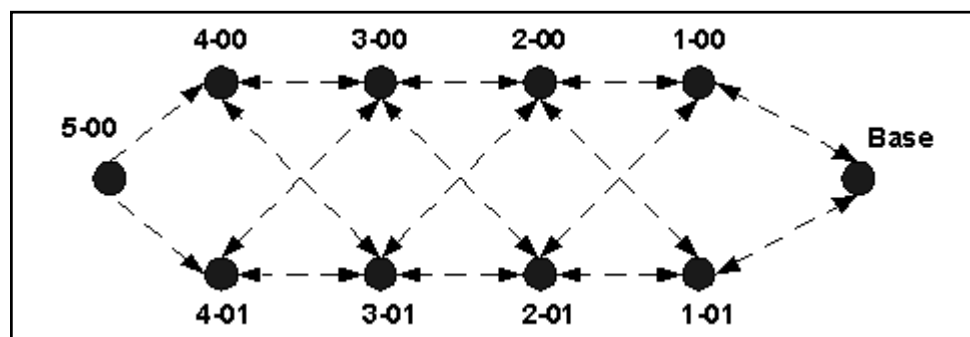


Figura 6.6 Diagrama de conexión lógica de los nodos durante la prueba de campo.

La primera prueba realizada pretende observar el enrutamiento dinámico del protocolo. En este entendido cada nodo empezará con un estado de carga de 255 y en cada participación se disminuirá este valor en 10, como se explicó anteriormente este valor es totalmente arbitrario pues no se sabe con certeza como afectará el proceso de envío de datos el estado de carga de cada nodo. Dado esto se simularon 8 eventos, la mitad de los cuales fueron dirigidos a cada uno de los nodos del nivel superior.

En la tabla 6.1 se muestran los datos recolectados en esta primera prueba. En esta se muestra la secuencia que siguen los datos en cada evento a través de los diferentes niveles. Como se observa, la ruta tomada por los datos varía en cada evento, dado que los niveles de carga de los nodos cambian con cada uno. Además, en los últimos eventos se muestra como el nivel de carga es muy similar para todos los nodos, esto significa que el gasto energético de cada nivel ha sido repartido equitativamente entre los nodos que lo conforman.

Tabla 6.1 Datos recogidos de la primer prueba de campo.

Numero de evento	Camino recorrido			
	Cuatro	Tres	Dos	Uno
1	4 - 01 / 245	3 - 01 / 245	2 - 01 / 245	1 - 01 / 245
2	4 - 01 / 235	3 - 00 / 245	2 - 00 / 245	1 - 00 / 245
3	4 - 01 / 225	3 - 01 / 235	2 - 01 / 235	1 - 01 / 235
4	4 - 01 / 215	3 - 00 / 235	2 - 00 / 235	1 - 00 / 235
5	4 - 00 / 245	3 - 00 / 225	2 - 00 / 225	1 - 00 / 225
6	4 - 00 / 235	3 - 01 / 215	2 - 01 / 225	1 - 01 / 225
7	4 - 00 / 225	3 - 00 / 215	2 - 00 / 215	1 - 00 / 215
8	4 - 00 / 215	3 - 01 / 215	2 - 01 / 215	1 - 01 / 215

Para la segunda prueba se hizo una variación en el estado de carga inicial en el nodo 3 – 01, pues su estado inicial fue puesto en 225 en lugar de 255. Luego se simularon eventos en el nivel superior para observar hasta cuando es nuevamente considerado este nodo para el ruteo. Como se observa en la tabla 6.2 se dan tres eventos antes de que este nodo vuelva a participar en la comunicación de la red y esto se da hasta que su vecino 3 – 00 tiene el mismo estado de carga que el nodo modificado. Lo anterior comprueba que el protocolo trata de repartir equitativamente el gasto energético del cada nivel lógico entre los nodos que lo conforman.

Tabla 6.2 Datos recogidos para la segunda prueba de campo.

Numero de evento	Camino recorrido			
	Uno	Dos	Tres	Cuatro
1	4 - 01 / 245	3 - 00 / 245	2 - 00 / 245	1 - 00 / 245
2	4 - 01 / 235	3 - 00 / 235	2 - 01 / 245	1 - 01 / 245
3	4 - 01 / 225	3 - 00 / 225	2 - 00 / 235	1 - 00 / 235
4	4 - 01 / 215	3 - 01 / 215	2 - 01 / 235	1 - 01 / 235

Se realizó una tercera prueba para comprobar la capacidad de reconfiguración en el caso de presentarse un fallo en alguno de los niveles de la red. Para esto se concibió el esquema de conexión mostrado en la figura 6.7. En este el nodo 2 – 01 será el detector del evento, pero ninguno de sus dos vecinos inferiores se encuentra activo. Además, todos los nodos empiezan con el mismo estado de carga de 255.

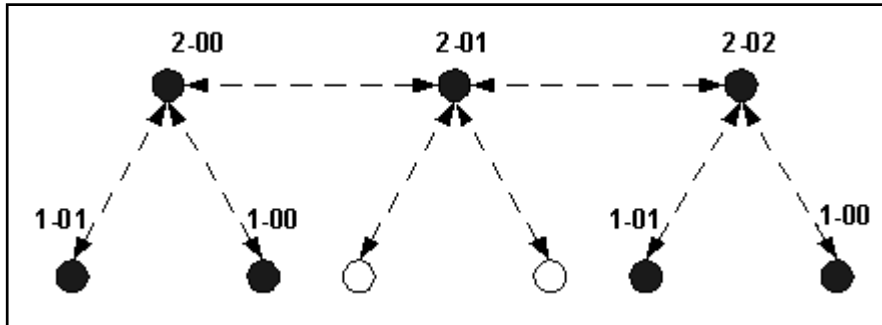


Figura 6.7 Diagrama de conexión lógica de los nodos para la tercera prueba de campo.

En la tabla 6.3 se observa los datos tomados para esta tercera prueba. Se simularon cuatro eventos en el nodo 2 – 01. En todos los casos se pasa 2 veces por el nivel dos, en el cual se captura la información. Hay que recordar que en caso de fallos, el protocolo desarrollado propone un cambio de ruta, enviando la información al nodo vecino del mismo nivel con mejor estado de carga. En el nivel siguiente se sigue el comportamiento normal, seleccionando el nodo con mejores recursos.

Tabla 6.3 Datos recogidos para la tercera prueba de campo.

Numero de evento	Camino recorrido		
	Dos	Dos	Uno
1	2 - 01 / 245	2 - 00 / 245	1 - 00 / 245
2	2 - 01 / 235	2 - 02 / 245	1 - 01 / 245
3	2 - 01 / 225	2 - 00 / 235	1 - 00 / 235
4	2 - 01 / 215	2 - 02 / 235	1 - 01 / 235

6.3 Hardware

Una característica importante del dispositivo de comunicación es el alcance de distancia que este posea. En las hojas de datos del AC4490 – 1000M tiene una potencia de transmisión típica de 743 mW, una sensibilidad típica de -100 dBm en el receptor y una frecuencia de transmisión de 902 MHz. Hay que recordar que la ganancia de la antena para el transmisor y del receptor es de 2 dBi. Utilizando la ecuación (3.9) se despeja la distancia de transmisión. Asimismo, se calcula que el rango de alcance del transceptor con a esta potencia típica será de 3,6 Km, lo cual cubre de sobremanera las necesidades planteadas para este proyecto.

Uno de las premisas de este proyecto es lograr dispositivos que tengan un bajo consumo de potencia. Tomando los datos de corriente y voltaje de alimentación se logró calcular el consumo de potencia para cada uno de los componentes y del circuito completo del nodo de la red, como se muestra en la tabla 6.4. El consumo de potencia típico es de 132 mW, este se dará cuando el transceptor está inactivo y el consumo máximo será de aproximadamente 1 W y se dará cuando este se encuentre transmitiendo datos.

Tabla 6.4 Consumo de potencia del nodo de la red y sus componentes.

Componente	V _{in} (V)	Corriente típica (mA)	Consumo potencia típico (mW)	Corriente máxima (mA)	Consumo potencia máximo (mW)
AC4490 – 1000M	3,3	30	99	295	973,5
PIC16LF874A	3,3	10	33	10	33
Totales			132		1006,5

Un gasto de 1 W es un valor elevado para una aplicación que posee limitaciones de alimentación, sin embargo hay que recordar que este se dará por lapso de milisegundos mientras se envían los datos, por lo que no es un valor tan crítico.

El consumo típico es tiene un valor bastante bajo, lo cual es ideal dado que el nodo siempre tiene que estar atento a la recepción de algún dato. Para ambos estados de actividad del nodo, el dispositivo de comunicación es el que consume la mayor cantidad energía, por esto habrá que enfocar esfuerzos en lograr que disminuir este consumo.

Se midió experimentalmente la corriente que pide le circuito a la fuente y se obtuvo un valor de 40,6 mA, el cual concuerda de manera muy precisa con la información de los fabricantes. Sin embargo no se pudo obtener experimentalmente la corriente en estado de transmisión, pues no se contó con un instrumento de medición capaz de medir la variación de corriente en un tiempo tan corto.

Otro punto importante en este proyecto es llegar a un producto final con que implique el menor gasto económico posible. Hay que recalcar que la puesta en operación del sistema final implica la creación de una cantidad considerable de nodos y el costo de los mismos afectara la viabilidad del proyecto a futuro.

En las tablas 6.5 y 6.7 se encuentran detallados los costos de cada uno de los componentes utilizados en los circuitos creados. Asimismo se tiene que valor de un nodo será de \$ 93,4 y para la estación base será de \$ 90,24.

Tabla 6.5 Costos en dólares de los componentes del nodo de la red.

Componente	Cantidad	Precio por unidad (\$)	Precio total (\$)
AC4490 – 1000M	1	67,5	67,5
Antena	1	15	15
LM3940	1	2,05	2,05
PIC16LF874A	1	7,7	7,7
Cristal 8 MHz	1	0,78	0,78
Capacitores	2	0,1	0,2
Resistencias	2	0,021	0,042
Botón pulsador	1	0,125	0,125
Costo total			93,4

Tabla 6.6 Costos en dólares de los componentes de la estación base de la red.

Componente	Cantidad	Precio por unidad (\$)	Precio total (\$)
AC4490 – 1000M	1	67,5	67,5
Antena	1	15	15
LM3940	1	2,05	2,05
MAX232	1	4	4
Interruptor	1	0,8	0,8
Capacitores	7	0,1	0,7
Resistencias	3	0,021	0,063
Botón pulsador	1	0,125	0,125
Costo total			90,24

A estos valores mostrados se le agregarán \$ 10 por los costos de la creación de los circuitos impresos. Dado esto, los costos totales serán de \$ 103,4 para el nodo y de \$ 100,24 para la estación base. Al tipo de cambio actual estos equivalen a ₡ 49735 y ₡ 48215, los cuales son valores muy elevados comparados sistemas de nodos integrados y creados para aplicaciones específicas. Hay que recalcar que el dispositivo de comunicación representa más de la mitad de estos costos, por lo cual se recomendará que un nuevo grupo de trabajo se dé a la tarea de crear un sustituto para este.

El programa utilizado para el soporte del protocolo de red creado demanda un 15 % de la memoria de programa y un 40 % de la memoria de datos del microcontrolador seleccionado. Esto muestra la sencillez del mismo, pues requirió muy poco de los recursos para su implementación.

En las figuras 6.7 y 6.8 se muestran los prototipos finales creados para el nodo y estación base de la red implementada. Estos fueron creados sobre placas impresas de 5 cm por 7,5 cm, lo cual los hace bastantes fáciles de manejar dadas sus pequeñas dimensiones.



Figura 6.8 Prototipo final para la estación base de la red.



Figura 6.9 Prototipo final para el nodo de la red.

Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

- Un sistema de enrutamiento dinámico basado en el estado de carga de los nodos conserva mejor los recursos energéticos de la red que un enrutamiento estático.
- La concepción de niveles lógicos sustituye el manejo de la ubicación geográfica de cada nodo.
- El protocolo planteado distribuye el gasto energético de cada nivel equitativamente entre sus nodos participantes.
- El sistema es capaz de escoger una nueva ruta para los datos en caso de fallos en algún punto de la red.
- El hardware creado para el nodo de la red tiene un bajo consumo de potencia máximo de 1 W y un consumo típico de 132 mW.
- El dispositivo de comunicación es el que más recursos energéticos y económicos demanda.
- Se logró conexión entre nodos a más de 500 metros de distancia.

7.2 Recomendaciones

- En este trabajo se determinó que el dispositivo de comunicación inalámbrica consume gran parte de los recursos energéticos y económicos, por esta razón se recomienda la creación de un grupo de trabajo cuya meta sea la creación de una solución de comunicación diseñada para cumplir con las necesidades específicas del sistema final, procurando así la eficiencia y viabilidad del mismo.
- Al protocolo desarrollado será necesario incluirle una nueva función que permita a la base consultar periódicamente el estado de los nodos de la red para comprobar que se encuentran en correcto funcionamiento y no dañados. La creación de esta nueva primitiva debe considerar las consecuencias negativas de este proceso, como el gasto energético que demandará.
- Es imperativo la implementación de la solución planteada en este trabajo con los otros prototipos del sistema en un área boscosa, así se podrá observar su comportamiento en un ambiente no controlado y más real.
- Evaluar la posibilidad de establecer contacto con grupos de trabajo de otras universidades que estén orientados a la creación de redes inalámbricas de sensores, con la intención de intercambiar información y experiencia en el desarrollo de este tipo de sistemas.
- Es necesaria realizar la simulación del protocolo creado en una herramienta de más poderosa, tal como SDL (Specification and Description Language). Procurando mayor flexibilidad a la hora de manipular y medir un mayor número de variables y realizar simulaciones de forma más estocástica.

Bibliografía

- [1] Barton, J. *Miniaturized Modular Wireless Sensor Networks* [en línea]: National Microelectronic Research Center Lee Maltings, Ireland. <www.media.mit.edu/resenv/pubs/papers/2002-09-NMRC-UBICOMP-poster.pdf>
- [2] Bharathidasan, A. *Sensor Networks: An Overview* [en línea]: Department of Computer Science, University of California. <wwwcsif.cs.ucdavis.edu/~bharathi/sensor/survey.pdf>
- [3] Bergamo, P. *RWPS: A Low Computation Routing Algorithm for Sensor Networks* [en línea]: Engineering Department, University of Ferrara. <Italy<http://www.cs.ucla.edu/NRL/wireless/uploads/bergamo.pdf>>
- [4] Bertocchi, F. *MAC and Routing Solution for Energy Saving in Ad Hoc Networks: Distributed Power Control* [en línea]: University of Ferrara. <gm.chaos.cc/paper/119.pdf>
- [5] Blake, R. *Sistemas electrónicos de comunicaciones*. International Thompson Editores. México, 2004.
- [6] Braginsky, D. *Rumor Routing Algorithm For Sensor Networks* [en línea]: Computer Science Department, University of California. <www.ee.unlv.edu/~jolly/docs/documents/Sensor/BR02.pdf>
- [7] Chiasserini, C. F. *Modeling the Performance of Wireless Sensor Networks* [en línea]: Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Torino. <http://www.ieee-infocom.org/2004/Papers/06_1.PDF>
- [8] Davis, W. B. *Graphical Model Theory for Wireless Sensor Networks* [en línea]: Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California. <<http://repositories.cdlib.org/cgi/viewcontent.cgi?article=2383&context=lbln>>

- [9] Demirkol, I. *MAC Protocols for Wireless Sensor Networks* [en línea]: Network Research Laboratory, Computer Engineering Department of Bogazici University, Turkey. <www.cmpe.boun.edu.tr/~ilker/IlkerDEMIRKOL_COMMAG.pdf>
- [10] Efrat, A. *Approximation Algorithms for Two Optimal Location Problems in Sensor Networks* [en línea]: Department of Computer Science; University of Arizona. 2004. <valis.cs.uiuc.edu/~sariel/papers/04/sensors/sensors.pdf>
- [11] Ganesan, D. *Highly-Resilient, Energy-Efficient Multipath Routing in Wireless Sensor Networks* [en línea]: Computer Science Department, UCLA. <lecs.cs.ucla.edu/Publications/papers/Deepak-Multipath-MC2R.pdf>
- [12] Heinzelman, W. *Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Micro sensor Networks* [en línea]: Massachusetts Institute of Technology. <www.eecs.harvard.edu/~mdw/course/cs263/fa03/papers/leach-hicss00.pdf>
- [13] Hong, X. *Load Balanced, Energy-Aware Communications for Mars Sensor Networks* [en línea]: Computer Science Department, University of California at Los Angeles. <lecs.cs.ucla.edu/~hbwang/publications/hxy-bigsky.pdf>
- [14] Huang, C. *The Coverage Problem in a Wireless Sensor Network* [en línea]: Department of Computer Science and Information Engineering, National Chiao-Tung University. <www.csie.nctu.edu.tw/~yctseng/papers.pub/mobile45-coverage-wsna.pdf>
- [15] IEEE Computer Society. *Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)* [en línea]: The Institute of Electrical and Electronics Engineers. <<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2003.pdf>>
- [16] Intanagonwiwat, C. *Directed Diffusion A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks* [en línea]: Information Sciences Institute, USC. <lecs.cs.ucla.edu/~estrin/papers/diffusion.ps>

- [17] Kephart, J. O. *The Vision of Autonomic Computing* [en línea]. IBM Thomas J. Watson Research Center: IEEE Computer Society. Enero, 2003. <www.research.ibm.com/autonomic/research/papers/AC_Vision_Computer_Jan_2003.pdf>.
- [18] Lewis, F. L. *Wireless Sensor Networks* [en línea]: Automation and Robotics Research Institute, University of Texas at Arlington. <<http://arri.uta.edu/acs/networks/WirelessSensorNetChap04.pdf>>.
- [19] Lim, A. *Distributed services for information dissemination in self-organizing sensor networks* [en línea]: Department of Computer Science and Engineering, Auburn University. <<http://www.eng.auburn.edu/users/lim/sensit/service.ps>>.
- [20] Pottie, G. J. *Wireless Integrated Network Sensors* [en línea]: Communications of the Association for Computing Machinery, May 2000, Vol. 43, No. 5. <www.csag.ucsd.edu/teaching/cse291s03/Readings/wins.pdf>.
- [21] Rabiner, W. *Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks* [en línea]: Massachusetts Institute of Technology. <www.cs.brown.edu/courses/cs295-1/adaptive.pdf>
- [22] Rugin, R. *A Simple and Efficient MAC-Routing Integrated Algorithm for Sensor Network* [en línea]: University of Ferrara. <gm.chaos.cc/paper/125.pdf>
- [23] Sahni, S. *Algorithms For Wireless Sensor Networks* [en línea]: Department of Computer and Information Science and Engineering, University of Florida, Septiembre, 2004. <www.cise.ufl.edu/~sahni/papers/sensors.pdf>
- [24] Wenliang, D. *A Key Management Scheme for Wireless Sensor Networks Using Deployment Knowledge* [en línea]: Department of Electrical Engineering and Computer Science, Syracuse University. <www.cis.syr.edu/~wedu/Research/paper/infocom04_sensor.pdf>

- [25] Ye, W. *Medium Access Control in Wireless Sensor Networks* [en línea]: Information Sciences Institute, University of Southern California. <www.isi.edu/~weiye/pub/isi-tr-580.pdf>
- [26] Zhong, L. C. *An Integrated Data-Link Energy model for Wireless Sensor Networks* [en línea]: Berkeley Wireless Research Center, University of California. <www.tkn.tu-berlin.de/tkn/publications/papers/wolisz_icc04v2.pdf>
- [27] Zian, F. *Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) vs Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) in Broadband Wireless Access (BWA) and Wireless LAN (WLAN)* [en línea]: Alvarion. Diciembre, 2001. <www.alvarion.com/RunTime/Materials/PDFFiles/FHvsDS-ver7.pdf>
- [28] Redes Inalámbricas [en línea]: 1997 <www.monografias.com/trabajos/redesinalam/redesinalam.shtml> [mayo 2005].

Apéndices

Apéndice A.1 Glosario, abreviaturas y simbología

Estación base o base o punto de control: será el punto hacia donde fluye toda la información en la red.

GPS: Global Positional System, en español: sistema de posicionamiento global.

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers, en español: Instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos.

MAC: Medium Access Control.

mAh: miliamperio hora.

Ni-MH: Níquel Metal Hídrido.

Nodo: componente mínimo de la red.

Protocolo: conjunto de reglas que controlan la secuencia de mensajes que ocurren durante una comunicación entre entidades que forman una red

Red: conjunto de nodos comunicados por un protocolo determinado.

Red dormida: red que permanece inactiva hasta que se detecte un evento en la misma.

RF: Radio Frecuencia.

RIS: Red Inalámbrica de sensores.

Ruteo dinámico: tipo de ruteo que permite establecer diferentes caminos entre la fuente y el destino.

SDL: Specification and Description Language.

Topología: disposición física o lógica en la que se conecta los componentes de una red.

Apéndice A.2 Código fuente

A.2.1 Programa de microcontrolador

```
#include <16F874A.h>
#use delay(clock=8000000)
#fuses HS,NOWDT
#use rs232(baud=9600,parity=N,xmit=PIN_C6,rcv=PIN_C7)
#fuses
NOWDT,NOPROTECT,XT,NOPUT,NOLVP,NOBROWNOUT,NOCPD,NOWRT

#use fast_io(A)
#use fast_io(B)
#use fast_io(D)

//////////////////////////////////*VARIABLES DEL PROGRAMA*//////////////////////////////////

#BYTE PORTA= 0x05
#BYTE PORTB= 0x06
#BYTE PORTD= 0x08

/*Variables *****/
BYTE DATO;          /*Almacena el valor del primer dato de una otra
                    o código de instrucción/
INT CONT=0;        //Variable de datos recibidos
INT i;             //Variable para contador
INT a;             //Variable para contador
INT x;             //Variable para contador

BYTE CARGA;
BYTE DATOS[10];    //Almacena los datos recibidos
BYTE REENVI[4];    //Almacena los datos a reenviar
BYTE TEMP[3];
BYTE CMAX;         //Indica un valor máximo de un contador
BOOLEAN REC=FALSE; /*Indica que se inicio la transmisión de una
                    instrucción/
BOOLEAN TRANS=FALSE; /*Indica que se termino la transmisión de una
                    instrucción/
BOOLEAN RE_TRA=FALSE; //Indica que hay una petición de retransmisión
BOOLEAN UPDATED=FALSE; /*Indica que se actualizo la información de los
                    nodos para trasmisión/
BOOLEAN ASK_STA=FALSE; //Indica que se recibió una solicitud de estado
BOOLEAN REC_STA=FALSE; //Indica que se recibió el estado de un nodo
```

```
/*Datos de estado del nodo *****/  
BYTE ESTADO[7]={0x02,0x01,0x12,0x04,0xBA,0xFF,0x00};  
/*  
ESTADO[0]    CAPA      Define la capa a la que pertenece el nodo  
ESTADO[1]    ID_RED   Identificación de red del nodo  
ESTADO[2]    DIR01    Byte de la dirección del nodo  
ESTADO[3]    DIR02    Byte de la dirección del nodo  
ESTADO[4]    DIR03    Byte de la dirección del nodo  
ESTADO[5]    S_BAT    Estado de carga de la batería  
ESTADO[6]    ALARMA   Define el estado de la alarma  
*/
```

```
/*Datos de identificación de los vecinos *****/  
BYTE VEC01[7]={0x01,0x01,0x10,0xA2,0x8F,0xFF,0x00};  
BYTE VEC02[7]={0x02,0x01,0x10,0xA2,0x8F,0xFF,0x00};  
/*  
VECxx[0]     CAPA      Define la capa a la que pertenece el nodo  
VECxx[1]     ID_RED   Identificación de red del nodo  
VECxx[2]     DIR01    Byte de la dirección del nodo  
VECxx[3]     DIR02    Byte de la dirección del nodo  
VECxx[4]     DIR03    Byte de la dirección del nodo  
VECxx[5]     S_BAT    Estado de carga de la batería  
VECxx[6]     ALARMA   Define el estado de la alarma  
*/
```

```
/*Datos de identificación de los nodos inferiores *****/  
BYTE INF01[7]={0x01,0x02,0x10,0xA2,0x8F,0xFF,0x00};  
BYTE INF02[7]={0x01,0x03,0x10,0xA2,0x8F,0xFF,0x00};  
/*  
INFxx[0]     CAPA      Define la capa a la que pertenece el nodo  
INFxx[1]     ID_RED   Identificación de red del nodo  
INFxx[2]     DIR01    Byte de la dirección del nodo  
INFxx[3]     DIR02    Byte de la dirección del nodo  
INFxx[4]     DIR03    Byte de la dirección del nodo  
INFxx[5]     S_BAT    Estado de carga de la batería  
INFxx[6]     ALARMA   Define el estado de la alarma  
*/
```

```
/*Definición de pines del entrada / salida del pic *****/
//PIN_C7  RX      entrada  Tx del puerto serial
//PIN_C6  TX      salida   Rx del puerto serial
//PIN_B1  RTS     entrada  Señal de petición para transmitir
//PIN_B2             salida  Señal de control del led
//PIN_D4  CTS     salida   Señal de listo para recibir
//PIN_D5  In_range entrada  Indica cuando el nodo esta en el rango
//PIN_D6  C/D     salida   Controla la transmisión de comandos o datos
//PIN_D7  RESET   salida   Controla el reset del transceptor

//////////////////////////////////*FUNCIONES DEL PROGRAMA*//////////////////////////////////

/*Reset por Hardware *****/
VOID RESET_H(){
    OUTPUT_HIGH(PIN_D7);
    DELAY_ms(20);
    OUTPUT_LOW(PIN_D7);
    DELAY_ms(10);
}

/*Envía los valores de un vector al puerto serie *****/
VOID ENV_TODO(BYTE A[7],BYTE C){
    FOR(i=0;i<C;++i){
        PUTC(A[i]);
    }
}

//Cambio dirección de destino *****/
VOID SET_DEST(BYTE A, BYTE B, BYTE C){
    OUTPUT_LOW(PIN_D6);    //Activa recepción de comandos
    DELAY_ms(2);
    PUTC(0xCC);           //Inicia secuencia de comandos
    DELAY_ms(1);
    PUTC(0x10);           //Indica comando a realizar
    DELAY_ms(1);
    PUTC(A);              //Envía primer byte de la dirección
    DELAY_ms(1);
    PUTC(B);              //Envía segundo byte de la dirección
    DELAY_ms(1);
    PUTC(C);              //Envía tercer byte de la dirección
    DELAY_ms(2);
    OUTPUT_HIGH(PIN_D6);  //Activa recepción de datos
    DELAY_ms(300);
}
}
```

```
/*Envía código de retransmisión y la información a retransmitir *****/
VOID ASK_RETRANS(){
    PUTC(0x33);          //Código de función
    ENV_TODO(REENVI,4); //Envía datos a retransmitir
    PUTC(0x33);          //Código de función
}

/*Solicitud de estado de un nodo *****/
VOID STATUS_REQ(BYTE Y[7]){
    SET_DEST(Y[2],Y[3],Y[4]); //Carga dirección MAC del nodo
    PUTC(0x31);              //Envía código de la función
    ENV_TODO(ESTADO,7);     //Envía información del nodo fuente
    PUTC(0x31);              //Envía código de la función
    a=0;                     //Inicializa contador para el ciclo de espera
    WHILE(a<100){//Inicia ciclo de espera por 10 s
        IF(TRANS){
            TRANS=FALSE;
            IF(REC_STA){//Si recibió el estado del nodo
                REC_STA=FALSE; //Reinicia REC_STA
                x=x+1;
                Y[5]=DATOS[6];
                Y[6]=DATOS[7];
                IF(CARGA<DATOS[6]){//Guarda dirección anterior
                    CARGA=DATOS[6];
                    TEMP[0]=DATOS[3];
                    TEMP[1]=DATOS[4];
                    TEMP[2]=DATOS[5];
                }ELSE{
                    SET_DEST(TEMP[0],TEMP[1],TEMP[2]);//Cambia destino
                }
                a=200; //Sale del ciclo de espera
                UPDATED=TRUE; //Activa señal para iniciar transmisión de datos
            }
        }
        DELAY_ms(100); //Retardo del ciclo
        a=a+1;
    }
}
```

```
/*Solicita el estado de los nodos vecinos y decide a cual enviar *****/
VOID REQUEST(){
    UPDATED=FALSE;      //Inicializa UPDATED
    WHILE(!UPDATED){//Inicia ciclo
        CARGA=0x00;
        x=0;
        STATUS_REQ (INF01);    //Pide información de INF01
        STATUS_REQ (INF02);    //Pide información de INF02
        IF(x<2){
            STATUS_REQ (VEC01); //Pide información de VEC01
        }
        IF(x<2){
            STATUS_REQ (VEC02); //Pide información de VEC02
        }
        IF(!UPDATED){
            DELAY_ms(150000); //Tiempo de espera para reiniciar el ciclo
        }
    }
    ASK_RETRANS(); //Solicita retransmisión
    UPDATED=FALSE; //Inicializa UPDATED
    DELAY_ms(20);
}

/*Envia el estado del nodo *****/
VOID SEND_STATUS(){
    SET_DEST(DATOS[3],DATOS[4],DATOS[5]); //Carga dirección MAC del nodo
    PUTC(0x32); //Envía código de función
    ENV_TODO(ESTADO,7); //Envía estado
    PUTC(0x32); //Envía código de función
}

/*Rutina para atender una alarma *****/
VOID ALARMA(){
    UPDATED=FALSE;
    REENVI[0]=ESTADO[0]; //Carga los datos a enviar
    REENVI[1]=ESTADO[1];
    REENVI[2]=ESTADO[5];
    REENVI[3]=ESTADO[6];
    REQUEST(); //Inicia ciclo del protocolo
}
```

```
//Interrupción del puerto serie *****/
#int_rda
rda_isr(){
    OUTPUT_HIGH(PIN_D4);    //Desactiva la señal de listo para recibir
    DATOS[CONT]=GETC();    //Captura dato entrante
    enable_interrupts(INT_RDA);
    enable_interrupts(global); //Habilita interrupciones
    DATO=DATOS[0];    //Copia primer dato de la trama

    IF(DATO==0x31){//Código de STATUS_REQUEST
        REC=TRUE;
        ASK_STA=TRUE;
        CMAX=9;
    }ELSE IF(DATO==0x32){//Código de SEND_STATUS
        REC=TRUE;
        REC_STA=TRUE;
        CMAX=9;
    }ELSE IF(DATO==0x33){//Código de ASK_RETRANS
        REC=TRUE;
        RE_TRA=TRUE;
        CMAX=6;
    }ELSE{
        REC=FALSE;
    }
}
IF(REC){
    CONT=CONT+1;
    IF(CONT==CMAX){
        TRANS=TRUE;
        REC=FALSE;
        CONT=0;
    }
}
    OUTPUT_LOW(PIN_D4);    //Activa la señal de listo para recibir
} //end int_rda
```

```
/*Reenvía la alarma del nodo anterior *****/
VOID RETRANS(){
  UPDATED=FALSE;
  FOR(i=0;i<4;++i){
    REENVI[i]=DATOS[i+1];    //Carga los datos a reenviar
  }
  IF(ESTADO[0]>1){          //Chequea que el nodo este en el nivel 1
    REQUEST();
  }ELSE{
    ASK_RETRANS();
  }
}
```

```
//////////////////////////////////*Programa principal*//////////////////////////////////
```

```
void main(){
//Configuración del microcontrolador
  setup_adc_ports(NO_ANALOGS);
  setup_adc(ADC_CLOCK_DIV_2);
  setup_spi(FALSE);
  setup_psp(PSP_DISABLED);
  setup_counters(RTCC_INTERNAL,RTCC_DIV_2);
  setup_timer_1(T1_DISABLED);
  setup_timer_2(T2_DISABLED,0,1);
  setup_ccp1(CCP_OFF);
  setup_ccp2(CCP_OFF);
  enable_interrupts(INT_RDA);
  enable_interrupts(global);

  SET_TRIS_A(0x00);
  SET_TRIS_B(0x02);
  SET_TRIS_D(0x20);

//Inicializa variables del programa

  RESET_H();
  OUTPUT_LOW(PIN_D7);
  OUTPUT_HIGH(PIN_D6);
  OUTPUT_LOW(PIN_D4);
  OUTPUT_LOW(PIN_A0);
  TEMP[0]=INF01[2];
  TEMP[1]=INF01[3];
  TEMP[2]=INF01[4];
  BIT_SET(PORTB,2);
  DELAY_ms(2000);
```

```
WHILE (TRUE) { //Ciclo principal
  IF(BIT_TEST(PORTD,5)){ //Verifica si se esta en rango
    RESET_H();
    DELAY_ms(5000);
  }ELSE{
    IF(TRANS){ //Chequea estado de TRANS
      IF(ASK_STA){ //Atiende solicitud de estado
        ASK_STA=FALSE;
        SEND_STATUS();
      }
      IF(RE_TRA){ //Atiende solicitud de retransmisión
        RETRANS();
        RE_TRA=FALSE;
      }
      TRANS=FALSE;
    }
  }
}
}
```


Apéndice A.3 Circuitos impresos

Apéndice A.3.1 Nodo de red

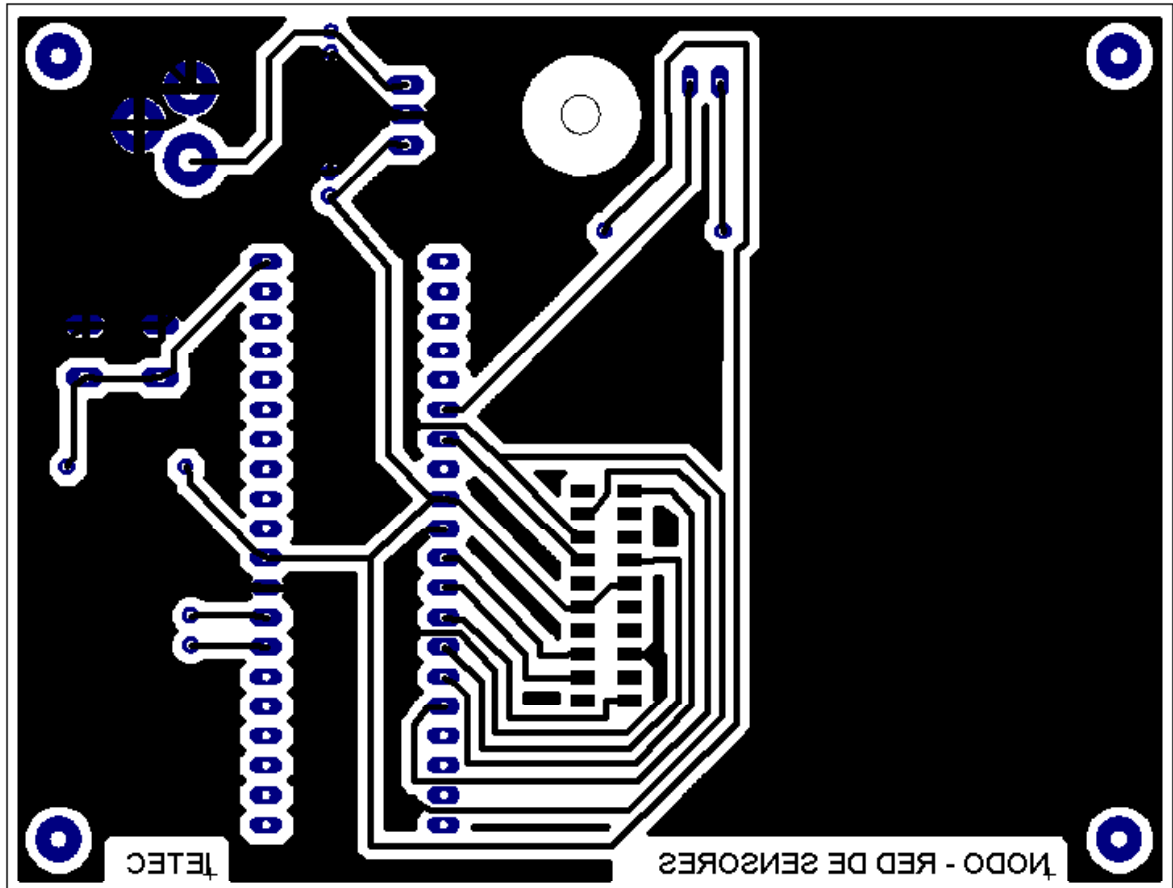


Figura A.3.1 Negativo para la placa impresa del nodo de la red-

Apéndice A.3.2 Estación Base

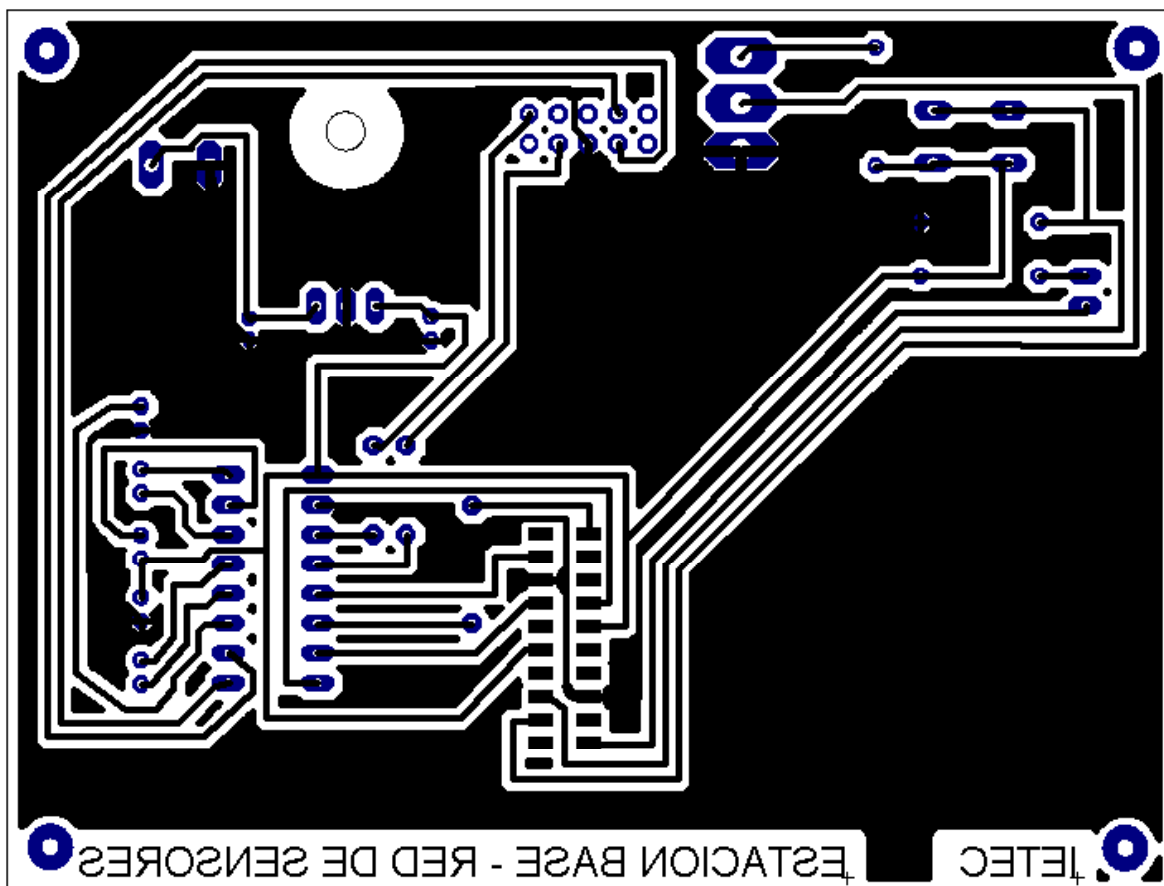


Figura A.3.2 Negativo para la placa impresa de la estación base de la red-

Apéndice A.4 Información sobre la Institución

Apéndice A.4.1 Descripción general

En 1971 fue creada la segunda universidad pública del país, diseñada para formar profesionales con una sólida base científico-tecnológica y humanista. El Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), es una institución dedicada a la docencia, la investigación y la extensión de la tecnología y ciencias conexas necesarias para el desarrollo de Costa Rica.

La acción integrada de la docencia, la investigación y la extensión está orientada al cumplimiento de los siguientes fines:

- Formar profesionales en el campo tecnológico que aúnen al dominio de su disciplina una clara conciencia del contexto socioeconómico, cultural y ambiental en que la tecnología se genera, transfiere y aplica, lo cual les permite participar en forma crítica y creativa en las actividades productivas nacionales.
- Generar, adaptar e incorporar, en forma sistemática y continua, la tecnología necesaria para utilizar y transformar provechosamente para el país sus recursos y fuerzas productivas.
- Contribuir al mejoramiento de la calidad de vida del pueblo costarricense mediante la proyección de sus actividades a la atención y solución de los problemas prioritarios del país, a fin de edificar una sociedad más justa.
- Estimular la superación de la comunidad costarricense mediante el patrocinio y el desarrollo de programas culturales.

La misión del ITCR es “Contribuir al desarrollo integral del país, mediante la formación de recursos humanos, la investigación y la extensión; manteniendo el liderazgo científico-tecnológico y técnico, la excelencia académica y el estricto apego

a las normas éticas, humanistas y ambientales, desde una perspectiva universitaria estatal de calidad y competitividad en el ámbito nacional e internacional”.

Apéndice A.4.2 Descripción del departamento dónde se realizó el proyecto

La Escuela de Ingeniería Electrónica nace como una iniciativa de conjunta de los gobiernos de Alemania y de Costa Rica. Esta inicia sus funciones a partir de 1976 con el apoyo y dirección de profesionales alemanes y a partir de 1979 sus funciones están a cargo del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

El Escuela de Ing. Electrónica tiene como principales funciones la docencia, investigación y extensión a la sociedad en las siguientes ramas: sistemas digitales, comunicaciones eléctricas, electrónica de potencia, control automático, telemática y demás áreas de la electrónica. Los estudiantes de la escuela se encuentran dentro de un programa de licenciatura, el cual esta en proceso de acreditación en el ámbito internacional. Además, la escuela cuenta con la revista TeraBit, que sirve como medio para difundir las actividades y proyectos que se desarrollan en la industria, en la empresa estatal, en la Escuela o en cursos de la carrera.

La escuela cuenta con más de veinte profesores, los cuales están especializados en las distintas ramas de la carrera y cuentan con títulos desde la licenciatura hasta doctorado, además de los que se encuentran aumentando nivel académico en el exterior. El actual director de la escuela es el Ing. Luis Paulino Méndez.

Apéndice A.5 Antecedentes prácticos

El presente trabajo forma parte de un proyecto que inició en el año 2003 y que pretende aplicar la electrónica para la protección, mediante la implementación de un sistema de monitoreo de zonas boscosas. Este sistema será capaz de detectar indirectamente actividades ilegales en los bosques, para esto se concibió la creación de teledetectores de fuego, disparos y motosierras. Dado que la consecución de esta meta involucra muchas áreas distintas, se decidió dividirlo en diferentes grupos de trabajo enfocados en un objetivo específico.

En el 2004 el se dieron los primeros frutos, cuando uno de estos grupos presentó la primera propuesta para un detector de motosierras capaz de identificar a una distancia de 150 metros. Este prototipo está compuesto por un micrófono que captura la señal de audio del ambiente, luego esta es amplificada para luego ser discriminada en una serie de filtros pasa banda de banda angosta centrados en las frecuencias características determinadas para una motosierra. Este fue un gran primer paso, sin embargo este presenta problemas en la discriminación conforme se aumenta la distancia.

A mediados del 2004 empiezan sus labores, paralelamente con este proyecto, otros grupos de trabajo. Uno de estos está encargado de brindar solución a la limitante de energía que presenta el sistema, para esto se está proponiendo la utilización de paneles solares para alargar la vida útil del sistema. Dos grupos se encuentran trabajando juntos para un dispositivo de discriminación de sonido que supere al detector de motosierras existente y a la vez usar su principio de funcionamiento para la detección de disparos. Otro grupo inició la investigación de las posibles técnicas de detección de fuego y se espera que pronto se inicie el diseño de un prototipo que cumpla con esta función.

En lo que respecta a la comunicación inalámbrica y control de la red, el presente trabajo es el primero enfocado en esta área y se espera que los logros obtenidos sirvan como base para una solución integral en el futuro.

Anexos

Especificaciones AC4490 - 1000M

GENERAL																																				
20 Pin Interface Connector	Samtec TMM-110-01-L-D-SM, mates with Samtec SMM-110-02-S-D																																			
RF Connector	Telegärtner J01341C0081, mates with any manufacturer's MMCX style plug																																			
Antenna	AC4490-200/AC4486-5: MMCX Connector or integral antenna AC4490-1000/AC4486-500: MMCX Connector																																			
Serial Interface Data Rate	Baud rates from 1200 bps to 115,200 bps																																			
Power Consumption (typical)	<p style="text-align: center;">Duty Cycle (TX=Transmit; RX=Receive)</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th></th> <th>10%TX</th> <th>50%TX</th> <th>100%TX</th> <th>100%RX</th> <th>Pwr-Down</th> <th>Deep Sleep</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>AC4490-200:</td> <td>38mA</td> <td>68mA</td> <td>106mA</td> <td>30mA</td> <td>19mA</td> <td>6mA</td> </tr> <tr> <td>AC4490-1000:</td> <td>126mA</td> <td>508mA</td> <td>985mA</td> <td>30mA</td> <td>19mA</td> <td>6mA</td> </tr> <tr> <td>AC4486-5:</td> <td>31mA</td> <td>35mA</td> <td>40mA</td> <td>30mA</td> <td>19mA</td> <td>6mA</td> </tr> <tr> <td>AC4486-500:</td> <td>126mA</td> <td>508mA</td> <td>985mA</td> <td>30mA</td> <td>19mA</td> <td>6mA</td> </tr> </tbody> </table>		10%TX	50%TX	100%TX	100%RX	Pwr-Down	Deep Sleep	AC4490-200:	38mA	68mA	106mA	30mA	19mA	6mA	AC4490-1000:	126mA	508mA	985mA	30mA	19mA	6mA	AC4486-5:	31mA	35mA	40mA	30mA	19mA	6mA	AC4486-500:	126mA	508mA	985mA	30mA	19mA	6mA
	10%TX	50%TX	100%TX	100%RX	Pwr-Down	Deep Sleep																														
AC4490-200:	38mA	68mA	106mA	30mA	19mA	6mA																														
AC4490-1000:	126mA	508mA	985mA	30mA	19mA	6mA																														
AC4486-5:	31mA	35mA	40mA	30mA	19mA	6mA																														
AC4486-500:	126mA	508mA	985mA	30mA	19mA	6mA																														
Channels	5 Channel Sets comprising 58 total channels																																			
Security	One byte System ID. 56 bit DES encryption key.																																			
Interface Buffer Size	Input/Output: 256 bytes each																																			
TRANSCIVER																																				
Frequency Band	US/Canada: 902 – 928 MHz Australia: 915 – 928 MHz Europe 5mW: 869.7 – 870 MHz Europe 500mW: 869.4 – 869.65 MHz																																			
RF Data Rate	76.8kbps fixed																																			
Transceiver Type	AC4490: Frequency Hopping Spread Spectrum AC4486: Single Frequency FSK																																			
Output Power	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th></th> <th>Conducted (no antenna)</th> <th>EIRP (3dBi gain antenna)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>AC4490-200:</td> <td>100mW typical</td> <td>200mW typical</td> </tr> <tr> <td>AC4490-1000:</td> <td>743mW typical</td> <td>1486mW typical</td> </tr> <tr> <td>AC4486-5:</td> <td>2.5mW typical</td> <td>5mW typical</td> </tr> <tr> <td>AC4486-500:</td> <td>250mW typical</td> <td>500mW typical</td> </tr> </tbody> </table>		Conducted (no antenna)	EIRP (3dBi gain antenna)	AC4490-200:	100mW typical	200mW typical	AC4490-1000:	743mW typical	1486mW typical	AC4486-5:	2.5mW typical	5mW typical	AC4486-500:	250mW typical	500mW typical																				
	Conducted (no antenna)	EIRP (3dBi gain antenna)																																		
AC4490-200:	100mW typical	200mW typical																																		
AC4490-1000:	743mW typical	1486mW typical																																		
AC4486-5:	2.5mW typical	5mW typical																																		
AC4486-500:	250mW typical	500mW typical																																		
Supply Voltage	AC4490-200: 3.3 ±2% or 3.45 - 6V (depending on model), ±50mV ripple AC4490-1000: Pin 10: 3.3 – 5.5V ±50mV ripple Pin 11: 3.3 ±3%, ±50mV ripple AC4486-5: 3.3 ±2% or 3.45 - 6V (depending on model), ±50mV ripple AC4486-500: Pin 10: 3.3 – 5.5V ±50mV ripple Pin 11: 3.3 ±3%, ±50mV ripple																																			
Sensitivity	-100dBm typical @ 76.8kbps																																			
Range, Line of Site (based on 3dBi gain antenna)	AC4490-200: 4 miles AC4490-1000: 20 miles AC4486-5: 3000 feet AC4486-500: 10 miles																																			
ENVIRONMENTAL																																				
Temperature (Operating)	-40°C to 80°C																																			
Temperature (Storage)	-50°C to +85°C																																			
Humidity (non-condensing)	10% to 90%																																			
PHYSICAL																																				
Dimensions	Transceiver with MMCX Connector: 1.65" x 1.9" x 0.20" Transceiver with Integral Antenna: 1.65" x 2.65" x 0.20"																																			
Weight	Less than 0.75 ounce																																			



PIC16F87X

28/40-pin 8-Bit CMOS FLASH Microcontrollers

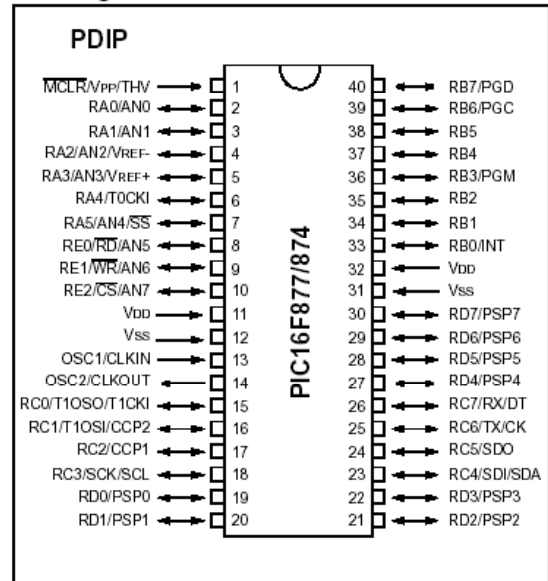
Devices Included in this Data Sheet:

- PIC16F873
- PIC16F876
- PIC16F874
- PIC16F877

Microcontroller Core Features:

- High-performance RISC CPU
- Only 35 single word instructions to learn
- All single cycle instructions except for program branches which are two cycle
- Operating speed: DC - 20 MHz clock input
DC - 200 ns instruction cycle
- Up to 8K x 14 words of FLASH Program Memory,
Up to 368 x 8 bytes of Data Memory (RAM)
Up to 256 x 8 bytes of EEPROM data memory
- Pinout compatible to the PIC16C73B/74B/76/77
- Interrupt capability (up to 14 sources)
- Eight level deep hardware stack
- Direct, indirect and relative addressing modes
- Power-on Reset (POR)
- Power-up Timer (PWRT) and
Oscillator Start-up Timer (OST)
- Watchdog Timer (WDT) with its own on-chip RC
oscillator for reliable operation
- Programmable code-protection
- Power saving SLEEP mode
- Selectable oscillator options
- Low-power, high-speed CMOS FLASH/EEPROM
technology
- Fully static design
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP) via two
pins
- Single 5V In-Circuit Serial Programming capability
- In-Circuit Debugging via two pins
- Processor read/write access to program memory
- Wide operating voltage range: 2.0V to 5.5V
- High Sink/Source Current: 25 mA
- Commercial and Industrial temperature ranges
- Low-power consumption:
 - < 2 mA typical @ 5V, 4 MHz
 - 20 µA typical @ 3V, 32 kHz
 - < 1 µA typical standby current

Pin Diagram



Peripheral Features:

- Timer0: 8-bit timer/counter with 8-bit prescaler
- Timer1: 16-bit timer/counter with prescaler,
can be incremented during sleep via external
crystal/clock
- Timer2: 8-bit timer/counter with 8-bit period
register, prescaler and postscaler
- Two Capture, Compare, PWM modules
 - Capture is 16-bit, max. resolution is 12.5 ns
 - Compare is 16-bit, max. resolution is 200 ns
 - PWM max. resolution is 10-bit
- 10-bit multi-channel Analog-to-Digital converter
- Synchronous Serial Port (SSP) with SPI™ (Master
Mode) and I²C™ (Master/Slave)
- Universal Synchronous Asynchronous Receiver
Transmitter (USART/SCI) with 9-bit address
detection
- Parallel Slave Port (PSP) 8-bits wide, with
external RD, WR and CS controls (40/44-pin only)
- Brown-out detection circuitry for
Brown-out Reset (BOR)

Especificaciones

Key Features PICmicro™ Mid-Range Reference Manual (DS33023)	PIC16F873	PIC16F874	PIC16F876	PIC16F877
Operating Frequency	DC - 20 MHz	DC - 20 MHz	DC - 20 MHz	DC - 20 MHz
Resets (and Delays)	POR, BOR (PWRT, OST)	POR, BOR (PWRT, OST)	POR, BOR (PWRT, OST)	POR, BOR (PWRT, OST)
FLASH Program Memory (14-bit words)	4K	4K	8K	8K
Data Memory (bytes)	192	192	368	368
EEPROM Data Memory	128	128	256	256
Interrupts	13	14	13	14
I/O Ports	Ports A,B,C	Ports A,B,C,D,E	Ports A,B,C	Ports A,B,C,D,E
Timers	3	3	3	3
Capture/Compare/PWM modules	2	2	2	2
Serial Communications	MSSP, USART	MSSP, USART	MSSP, USART	MSSP, USART
Parallel Communications	—	PSP	—	PSP
10-bit Analog-to-Digital Module	5 input channels	8 input channels	5 input channels	8 input channels
Instruction Set	35 Instructions	35 Instructions	35 Instructions	35 Instructions



January 2003

LM3940 1A Low Dropout Regulator for 5V to 3.3V Conversion

General Description

The LM3940 is a 1A low dropout regulator designed to provide 3.3V from a 5V supply.

The LM3940 is ideally suited for systems which contain both 5V and 3.3V logic, with prime power provided from a 5V bus.

Because the LM3940 is a true low dropout regulator, it can hold its 3.3V output in regulation with input voltages as low as 4.5V.

The T0-220 package of the LM3940 means that in most applications the full 1A of load current can be delivered without using an additional heatsink.

The surface mount TO-263 package uses minimum board space, and gives excellent power dissipation capability when soldered to a copper plane on the PC board.

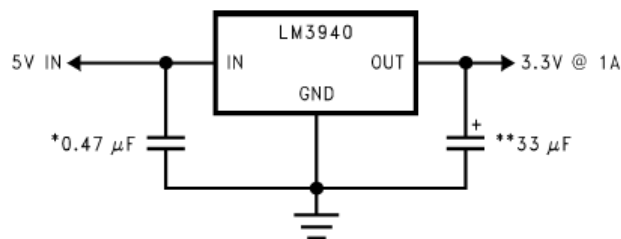
Features

- Output voltage specified over temperature
- Excellent load regulation
- Guaranteed 1A output current
- Requires only one external component
- Built-in protection against excess temperature
- Short circuit protected

Applications

- Laptop/Desktop Computers
- Logic Systems

Typical Application

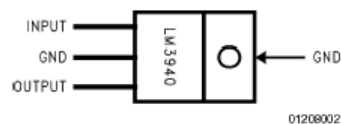


01208001

*Required if regulator is located more than 1" from the power supply filter capacitor or if battery power is used.

**See Application Hints.

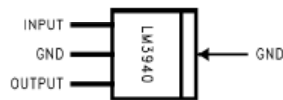
Connection Diagram/Ordering Information



01208002

3-Lead TO-220 Package
(Front View)

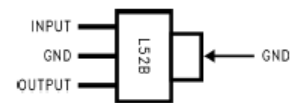
Order Part Number LM3940IT-3.3
NSC Drawing Number TO3B



01208003

3-Lead TO-263 Package
(Front View)

Order Part Number LM3940IS-3.3
NSC Drawing Number TS3B



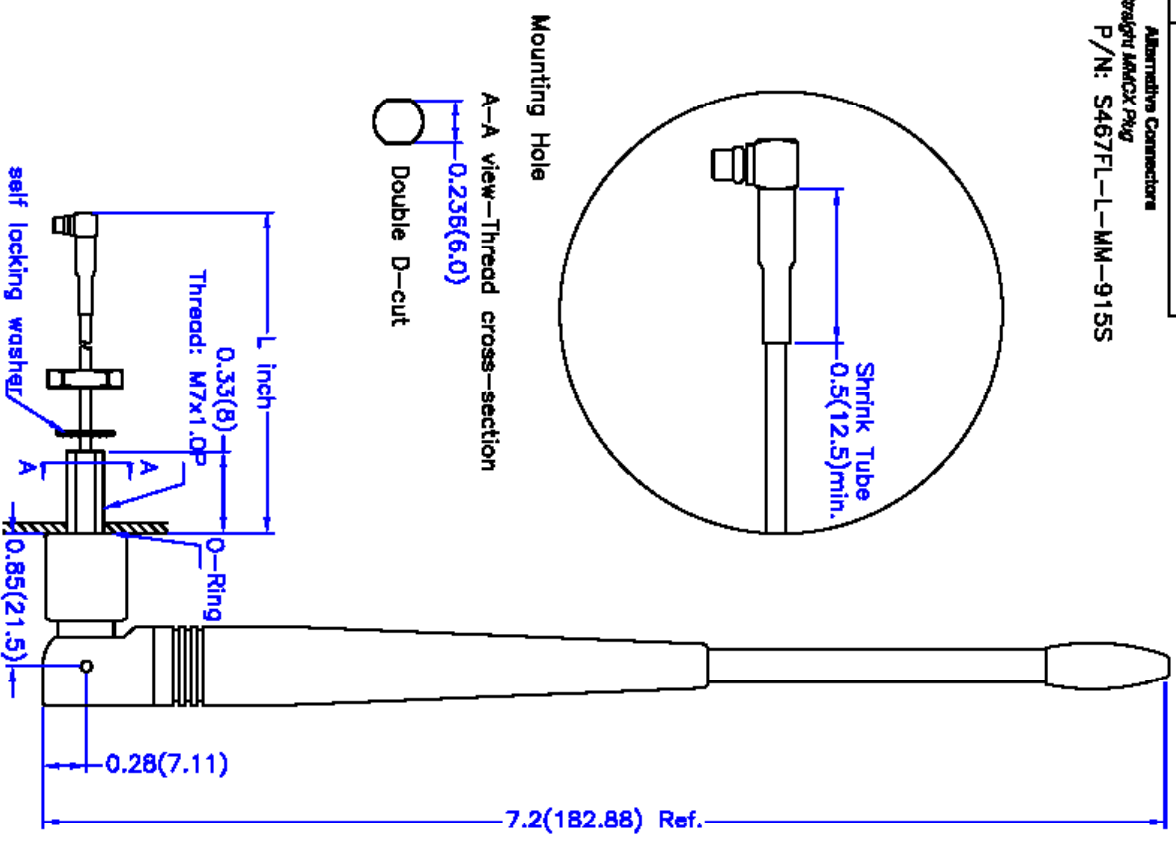
01208010

3-Lead SOT-223
(Front View)

Order Part Number LM3940IMP-3.3
Package Marked L52B
NSC Drawing Number MP04A

Absolute Maximum Ratings (Note 1)		Lead Temperature (Soldering, 5 seconds)	260°C			
If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.		Power Dissipation (Note 2)	Internally Limited			
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C	Input Supply Voltage	7.5V			
Operating Junction Temperature Range	-40°C to +125°C	ESD Rating (Note 3)	2 kV			
Electrical Characteristics						
Limits in standard typeface are for $T_J = 25^\circ\text{C}$, and limits in boldface type apply over the full operating temperature range. Unless otherwise specified: $V_{IN} = 5\text{V}$, $I_L = 1\text{A}$, $C_{OUT} = 33\ \mu\text{F}$.						
Symbol	Parameter	Conditions	Typical	LM3940 (Note 4)		Units
				min	max	
V_O	Output Voltage	$5\text{ mA} \leq I_L \leq 1\text{ A}$	3.3	3.20 3.13	3.40 3.47	V
$\frac{\Delta V_O}{\Delta V_I}$	Line Regulation	$I_L = 5\text{ mA}$ $4.5\text{V} \leq V_O \leq 5.5\text{V}$	20		40	mV
$\frac{\Delta V_O}{I_L}$	Load Regulation	$50\text{ mA} \leq I_L \leq 1\text{ A}$	35		50 80	
Z_O	Output Impedance	I_L (DC) = 100 mA I_L (AC) = 20 mA (rms) $f = 120\text{ Hz}$	35			mΩ
I_Q	Quiescent Current	$4.5\text{V} \leq V_{IN} \leq 5.5\text{V}$ $I_L = 5\text{ mA}$	10		15 20	mA
		$V_{IN} = 5\text{V}$ $I_L = 1\text{ A}$	110		200 250	
e_n	Output Noise Voltage	BW = 10 Hz–100 kHz $I_L = 5\text{ mA}$	150			μV (rms)
$V_O - V_{IN}$	Dropout Voltage (Note 5)	$I_L = 1\text{ A}$	0.5		0.8 1.0	V
		$I_L = 100\text{ mA}$	110		150 200	mV
$I_L(\text{SC})$	Short Circuit Current	$R_L = 0$	1.7	1.2		A
Thermal Performance						
Thermal Resistance Junction-to-Case	3-Lead TO-220	4				°C/W
	3-Lead TO-263	4				°C/W
Thermal Resistance Junction-to-Ambient	3-Lead TO-220	60				°C/W
	3-Lead TO-263	80				°C/W
	8-Lead LLP (Note 2)	35				°C/W
<p>Note 1: Absolute maximum ratings indicate limits beyond which damage to the component may occur. Electrical specifications do not apply when operating the device outside of its rated operating conditions.</p> <p>Note 2: The maximum allowable power dissipation is a function of the maximum junction temperature, T_J, the junction-to-ambient thermal resistance, θ_{JA}, and the ambient temperature, T_A. Exceeding the maximum allowable power dissipation will cause excessive die temperature, and the regulator will go into thermal shutdown. The value of θ_{JA} (for devices in still air with no heatsink) is 60°C/W for the TO-220 package, 80°C/W for the TO-263 package, and 174°C/W for the SOT-223 package. The effective value of θ_{JA} can be reduced by using a heatsink (see Application Hints for specific information on heatsinking). The value of θ_{JA} for the LLP package is specifically dependant on PCB trace area, trace material, and the number of layers and thermal vias. For improved thermal resistance and power dissipation for the LLP package, refer to Application Note AN-1187. It is recommended that 6 vias be placed under the center pad to improve thermal performance.</p> <p>Note 3: ESD rating is based on the human body model: 100 pF discharged through 1.5 kΩ.</p> <p>Note 4: All limits guaranteed for $T_J = 25^\circ\text{C}$ are 100% tested and are used to calculate Outgoing Quality Levels. All limits at temperature extremes are guaranteed via correlation using standard Statistical Quality Control (SQC) methods.</p> <p>Note 5: Dropout voltage is defined as the input-output differential voltage where the regulator output drops to a value that is 100 mV below the value that is measured at $V_{IN} = 5\text{V}$.</p>						

P/N: S467FL-L-RMM-9155
 Alternative Connectors
 Straight MMCX Plug
 P/N: S467FL-L-MM-9155



ECN	Date	Description
	8/30/02	change mounting thread/hole from round to double D-cut

Electrical Properties:

Frequency Range: 902~928 MHz
 Impedance: 50Ω nominal
 VSWR: <2.0:1
 Gain: *2.0 dBI
 Radiation: Omni
 Polarization: Vertical
 Wave: Half-Wave Dipole
 *Gain is measured under no flying lead.

Mechanical Properties:

Cable: M17/93-RG178; Harbour Industries
 Cable Length: Standard length L=5 inches, or to be specified.
 Connector: R/A MMCX Plug(male); Nearson 25-03M-T6G
 Material: Overmold: Polyurethane(Black); BASF
 Swivel: Polyurethane(Black); BASF and Polycarbonate(Black); Bayer
 Operation Temp.: -20°C to +65°C
 Storage Temp.: -30°C to +75°C

TITLE	UNIT	DWG. NO.	DATE	SHEET
900MHz Fixed Mount Swivel Antenna - 467 Model		S467FL-L-RMM-9155		1 of 2
NEARSON				

19-4323; Rev /D; 11/97



+5V-Powered, Multichannel RS-232 Drivers/Receivers

General Description

The MAX220-MAX249 family of line drivers/receivers is intended for all EIA/TIA-232E and V.28/V.24 communications interfaces, particularly applications where $\pm 12V$ is not available.

These parts are especially useful in battery-powered systems, since their low-power shutdown mode reduces power dissipation to less than $5\mu W$. The MAX225, MAX233, MAX235, and MAX245/MAX246/MAX247 use no external components and are recommended for applications where printed circuit board space is critical.

Applications

- Portable Computers
- Low-Power Modems
- Interface Translation
- Battery-Powered RS-232 Systems
- Multi-Drop RS-232 Networks

Features

Superior to Bipolar

- ◆ Operate from Single +5V Power Supply (+5V and +12V—MAX231/MAX239)
- ◆ Low-Power Receive Mode in Shutdown (MAX223/MAX242)
- ◆ Meet All EIA/TIA-232E and V.28 Specifications
- ◆ Multiple Drivers and Receivers
- ◆ 3-State Driver and Receiver Outputs
- ◆ Open-Line Detection (MAX243)

Ordering Information

PART	TEMP. RANGE	PIN-PACKAGE
MAX220CPE	0°C to +70°C	16 Plastic DIP
MAX220CSE	0°C to +70°C	16 Narrow SO
MAX220CWE	0°C to +70°C	16 Wide SO
MAX220C/D	0°C to +70°C	Dice*
MAX220EPE	-40°C to +85°C	16 Plastic DIP
MAX220ESE	-40°C to +85°C	16 Narrow SO
MAX220EWE	-40°C to +85°C	16 Wide SO
MAX220EJE	-40°C to +85°C	16 CERDIP
MAX220MJE	-55°C to +125°C	16 CERDIP

