

**Centro de Investigación Científica y de
Educación Superior de Ensenada**



**PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO PARA UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES
DE ÁREA AMPLIA**

TESIS

MAESTRIA EN CIENCIAS

ALDO ELEAZAR PÉREZ RAMOS

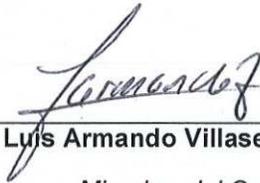
Ensenada, Baja California, México, Octubre de 2008.

TESIS DEFENDIDA POR
Aldo Eleazar Pérez Ramos
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ



Dr. Jaime Sánchez García

Director del Comité



Dr. Luis Armando Villaseñor González

Miembro del Comité



Dr. Arturo Velázquez Ventura

Miembro del Comité



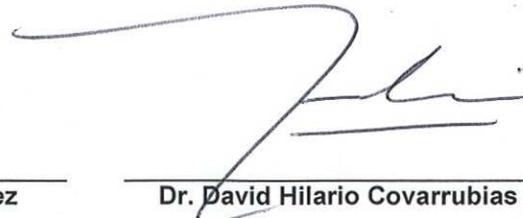
Dr. Pedro Negrete Regagnon

Miembro del Comité



Dr. Luis Alejandro Márquez Martínez

*Coordinador del programa de posgrado en
Electrónica y Telecomunicaciones.*



Dr. David Hilario Covarrubias Rosales

Director de Estudios de Posgrado

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DE ENSENADA**



**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO PARA UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES
DE ÁREA AMPLIA**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

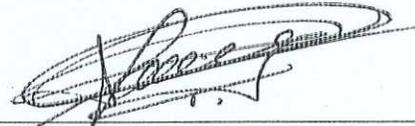
ALDO ELEAZAR PÉREZ RAMOS

Ensenada, Baja California, México, Octubre 2008.

RESUMEN de la tesis de Aldo Eleazar Pérez Ramos, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en ELECTRÓNICA y TELECOMUNICACIONES con orientación en Telecomunicaciones. Ensenada, Baja California. Octubre 2008.

PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO PARA UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES DE ÁREA AMPLIA.

Resumen aprobado por:



Dr. Jaime Sánchez García
Director de Tesis

En la actualidad las redes inalámbricas de sensores (*WSN-Wireless Sensor Networks*) han despertado gran interés en la comunidad científica y pública debido a que estas han llevado a la interacción entre humanos, medio ambiente y máquinas hacia nuevos paradigmas, tal como la llamada “inteligencia ambiental”

La versatilidad de este tipo de redes ha permitido que se utilicen en aplicaciones donde se requiere monitorear y recolectar información de sensores separados a grandes distancias y repartidos en áreas extensas, utilizando las Redes Inalámbricas de Sensores de Área Amplia (*WAWSN-Wide Area Wireless Sensor Networks*), las cuales a diferencia de las WSNs tradicionales cuentan con interfaces de radio que transmiten con gran potencia.

Una aplicación para la WAWSN se tiene en la Red de Deformaciones del Valle de Mexicali (RDEFVM) del Departamento de Sismología del CICESE, en donde se necesita recolectar información de tarjetas de adquisición de datos de manera inalámbrica, en nodos que se encuentran separados por varios kilómetros y que al no contar con interfaces de radio ocasiona que los datos se recolecten de forma manual mediante visitas de campo, incrementando costos de mantenimiento y originando retrasos en el análisis de los datos. La solución a dicha problemática ya ha sido tratada en la literatura, sin embargo el enrutamiento de los datos en la WAWSN que se propuso, depende en gran medida del funcionamiento de todos los nodos de la red, debido a que no se ejecuta un protocolo de enrutamiento que le permita responder a los cambios en la topología de la red de forma automática.

En este proyecto de tesis se desarrolló la circuitería y los programas necesarios para implementar la WAWSN, en un ambiente que permitiera observar el comportamiento de dos protocolos de enrutamiento auto configurables. En base a los resultados obtenidos al realizar las pruebas del funcionamiento en la red, se puede concluir que ambos protocolos proporcionan los parámetros de calidad de servicio que demanda la RDEFVM. También se pudo observar que uno de estos protocolos al disponer de un mecanismo automático de ajuste de la potencia de transmisión presentó mayor robustez ante fallas de nodos en la red.

Palabras Clave: Redes Inalámbricas de Sensores, Protocolos de enrutamiento, Redes de área amplia, Valle de Mexicali.

ABSTRACT of the thesis presented by **ALDO ELEAZAR PÉREZ RAMOS** as a partial requirement to obtain the **MASTER OF SCIENCE** degree in **ELECTRONIS AND TELECOMMUNICATIONS** with specialization in **TELECOMMUNICATIONS**. Ensenada, Baja California, México, October 2008.

ROUTING PROTOCOLS FOR WIDE AREA WIRELESS SENSOR NETWORKS

Recently wireless sensor networks (WSN) have gained great interest in public and scientific communities, because they are expected to bring the interaction between humans, environment and machines towards new paradigms such as "environment intelligence".

The versatility of WSNs has resulted in its utilization for applications where the sensor nodes are located far away from each other, allowing to observe and to gather information of environmental variables. This has been done by using a new type of networks called Wide Area Wireless Sensor Networks (WAWSN), where the nodes transmit with more power than the traditional WSNs.

The Mexicali Valley Deformations Network (RDEFMV) of the seismology department of CICESE, is one application for WAWSN where the distance between nodes is measured miles. In this application, it is required to gather information of dataloggers wirelessly, because up to date the data are manually gathered with a monthly periodicity through field visits, which originates a delay in the analysis of data. There exists in the literature a solution for this problem, however it has the disadvantage that the routing of data depends of the proper operation of all nodes in the network, because it does not have a self-configuration routing protocol.

In this thesis, the hardware and software required for the WAWSN was developed. The system was tested on an environment that allows us to observe the behavior of two self-configuration routing protocols. The results obtained from operational tests let us conclude that these protocols provide the quality of service parameters demanded by the RDEFVM network. Besides, it was observed that providing a mechanism to adjust transmission power, one of the protocols provides greater robustness to fails in the nodes of the network

Keywords: Wireless Sensor Networks, Routing Protocol, Wide Area Networks, Mexicali Valley.

Dedicatorias

A Dios.

*Por haberme permitido llegar hasta aquí, regalándome todo lo que para mí significa **Ensenada**.*

A mis padres

Por sus consejos, inmenso cariño y apoyo incondicional. Son los mejores padres que pude haber tenido, sin ustedes esto no hubiera sido posible.

A Karina

El amor de mi vida.

Agradecimientos

Quiero empezar agradeciendo a mi director de Tesis Dr. Jaime Sánchez García, por haber creído en mí al encomendarme tan bonito proyecto. Además de ser una persona que admiro y respeto por sus conocimientos y por su tan agradable forma de ser.

A los miembros de mi comité Dr. Luis Armando Villaseñor González, Dr. Arturo Velázquez Ventura y Dr. Pedro Negrete Regagnon, por sus valiosos aportes y comentarios durante la realización de este trabajo. Así también por ser parte fundamental de mi permanencia en tan prestigiado Centro de Investigación.

Tomando en cuenta el orden en que fueron apareciendo los actores de esta serie que duró bastante tiempo, empiezo agradeciendo a Karlita y su familia por habernos ayudado cuando no conocíamos a nadie en Ensenada. Al ahora Dr. José Luis Olvera Cervantes por sus consejos y apoyo en los momentos tan difíciles, eres grande amigo “Luigi”. A mis compañeros de generación 2005, Richard y Carlos (Kobe) por ser los primeros en ayudarme y apoyarme incondicionalmente en lo vivido en aquellos meses.. gracias!!.. A Beto y Sarai por sus consejos en mis momentos de confusión, Jonathan por su amistad y disposición para compartir sus conocimientos, Jorge por su paciencia y enseñanzas quien decidió compartir conmigo casa a sabiendas de lo que le esperaba, Iván y Mario por las historias e “información clasificada”, Andrés por guardarme el auto, Andalón (por los lonches, tortas y jugos), al Javo por hacerme ver mis límites, a Edna, Dania Lenin, Sergio, Marco, Daniel y Varun por también ser parte importante en aquella generación.

A mis compañeros de generación 2006 con los cuales forme excelentes lazos de amistad, empezando con el Oscar por ser como un hermano, Silvia, Nereyda y Viridiana quienes me hicieron sentir tan especial, a Obed por ser un buen amigo, al Joel, Erika y Adolfo por su amistad. A mis “hermanillos” el buen Jesús Aurelio y Cesar “Gerardo” alias el Torino, al Chuy por el paro con las mangueras de mi carro, al Ramiro y Josué por aquellas fotos, a

Cesar alias “Shakiras” por ser a todo dar, Antonio Candela por los envíos, a Deyanira (*¿¿que hacemos tan lejos tu??*), Adrian, Edgar y Elizabeth.

Y a petición de Irwin un párrafo dedicado solo para el, gracias por ayudarme a construir un correcto circuito impreso y por enseñarme una buena técnica para soldar componentes de montaje superficial, aunque no la haya dominado del todo, pero sobre todo te agradezco tu amistad.

También quiero agradecer al Ing. René Torres por proporcionarme todo el instrumental que necesité en el desarrollo de la tesis, al instructor Ricardo Núñez Pérez por compartir conmigo sus conocimientos y experiencias en el diseño de circuitos, y al M. en C. Ramón Muraoka por sus consejos y acceso a instrumentos que solo el puede proveer.

Agradezco al Maestro Jesús Padilla Velázquez, el cual ha sido un claro ejemplo de la hospitalidad y solidaridad ensenadense, estando ahí en todo momento ayudándome en la parte final de mi proyecto, sin duda he hecho un nuevo amigo.

Al personal del CICESE que se ha portado de una manera excelente conmigo, Aurora, Marisela y Rossy del Dpto. de Electrónica y Telecomunicaciones, a Norma Alicia, Ivonne Best, Citlali Romero y la M. en C. Dolores Sarracino, y a todos los Doctores que me impartieron cursos en la maestría, me llevo de ustedes lo mejor.

Agradezco al Depto. de Electrónica y Telecomunicaciones por haberme apoyado con dos meses de beca y en general al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, por haberme permitido ser parte de esta gran institución.

Al CONACYT por el apoyo económico recibido durante estos años para poder estudiar una maestría..... *Gracias!!*

CONTENIDO

	Página
Resumen español	i
Resumen inglés	ii
Dedicatorias	iii
Agradecimientos	iv
Lista de Figuras	ix
Lista de Tablas	xiv
Capítulo I. Introducción	1
I.1 Antecedentes.....	1
I.2 Planteamiento del Problema.....	2
I.2.1 Características y parámetros de calidad de servicio que se demandan de la RDEFVM.....	4
I.2.2 Trabajo relacionado.....	5
I.3 Objetivos.....	6
I.4 Organización de la tesis.....	7
Capítulo II. Redes Inalámbricas	9
II.1 Redes Inalámbricas Ad Hoc.....	9
II.1.1 Características de las Redes Inalámbricas Ad Hoc.....	10
II.1.2 Aplicaciones de las Redes Inalámbricas Ad-Hoc.....	12
II.2 Redes Inalámbricas de Sensores.....	13
II.2.1 Características de las Redes Inalámbricas de Sensores.....	15
II.2.2 Aplicaciones de las Redes Inalámbricas de Sensores.....	17
II.3 Diferencias entre las WSN y Redes Inalámbricas Ad-Hoc.....	18
Capítulo III. Rediseño de la interfaz inalámbrica	20
III.1 Nodo Sensor de la Red Inalámbrica de Sensores de Área Amplia.....	20
III.1.1 Fuente de Alimentación.....	22
III.1.2 Control Lógico y Puertos de Comunicación.....	25
III.1.2.1 Primer modelo.....	25
III.1.2.2 Segundo modelo.....	26
III.1.2.3 Tercer modelo.....	28
III.1.3 Tarjeta de Comunicación Inalámbrica.....	30
III.2 Implementación de la Interfaz Inalámbrica.....	34

CONTENIDO (continuación)

	Página
Capítulo IV. Protocolos de Enrutamiento	38
IV.1 Clasificación de Protocolos de Enrutamiento para Redes Inalámbricas de Sensores.....	39
IV.1.1 Basados en la Estructura de la Red.....	39
IV.1.2 Basados en como buscan ruta hacia un nodo en la red.....	41
IV.1.3. Basados en funcionamiento del protocolo.....	43
IV.2 Protocolo de enrutamiento por trayectorias múltiples hacia un nodo (M a 1)	45
IV.2.1 Algoritmo de configuración de la red.....	46
IV.2.2 Solicitud de ruta hacia un nodo sensor (Route Request).....	47
IV.2.3 Respuesta de un nodo sensor a la solicitud de ruta (Route Reply).....	49
IV.2.4. Recolección de Datos.....	49
IV.3 Protocolo de enrutamiento por trayectorias Múltiples a Múltiples nodos (M a M).....	51
IV.3.1. Descubrimiento de nodos vecinos e integración a la red.....	51
IV.3.2. Solicitud de ruta hacia un nodo sensor (Route Request).....	55
IV.3.3. Respuesta de un nodo sensor a la solicitud de ruta (Route Reply).....	56
IV.3.4. Recolección de Datos.....	57
 Capítulo V. Implementación de temporizadores y protocolos de enrutamiento	 60
V.1. Generación de retardos pseudoaleatorios en el microcontrolador.....	60
V.2. Generación de un Reloj de Tiempo Real (RTC) en el microcontrolador.....	64
V.3. Implementación del protocolo de enrutamiento por trayectorias múltiples a un nodo M a 1.....	67
V.4. Implementación del protocolo de enrutamiento por trayectorias múltiples a múltiples nodos (M a M).....	70
 Capítulo VI. Implementación de la Red Inalámbrica de Sensores de Área Amplia en un ambiente de laboratorio	 76
VI.1. Caracterización de las interfaces inalámbricas e instalación en la zona de pruebas.....	76
VI.2. Pruebas del funcionamiento del protocolo de enrutamiento por trayectorias múltiples M a 1 y resultados obtenidos.....	87
VI.3. Pruebas del funcionamiento del protocolo de enrutamiento por trayectorias múltiples M a M y resultados obtenidos.....	97
VI.4. Ventajas y Desventajas de los protocolos de enrutamiento implementados en las interfaces inalámbricas.....	107
 Capítulo VII. Conclusiones y Trabajo a futuro	 108
VII.1 Conclusiones.....	108
VII.2 Contribuciones.....	109
VII.3 Trabajo a futuro.....	109

CONTENIDO (continuación)

	Página
Referencias	112
Anexos	118
A.1. Análisis del consumo de potencia.....	118
A.2. Diagrama y negativo del circuito impreso del primer modelo de interfaz Inalámbrica.....	124
A.3 Diagramas y negativos del circuito impreso del segundo y tercer modelo de interfaz inalámbrica.....	125
A.4 Resultados de las mediciones de enlaces punto a punto realizadas.....	128

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura</i>		Página
1	Red de Sensores de Deformación del Valle de Mexicali.	3
2	Red Inalámbrica Ad-Hoc	10
3	Red Inalámbrica de Sensores	15
4	Nodo “Corral Vacas” de la Red de Deformación del Valle de Mexicali	21
5	Nodo Sensor de la Red Inalámbrica de Sensores de Área Amplia	21
6	Fuente de Alimentación Lineal	22
7	Fuente de Alimentación conmutada	24
8	Control lógico del primer modelo de interfaz inalámbrica	26
9	Control lógico del segundo modelo de interfaz inalámbrica	27
10	Control lógico del tercer modelo de interfaz inalámbrica	29
11	Tarjeta de comunicación inalámbrica de gran alcance AC4790-1000	31
12	Modo de transmisión Full Dúplex.	33
13	Implementación del segundo modelo de interfaz inalámbrica.	35
14	Implementación del tercer modelo de interfaz inalámbrica.	36
15	Clasificación de los Protocolos de Enrutamiento para Redes Inalámbricas de Sensores.	40
16	Formato del mensaje RPRI en el protocolo de enrutamiento M a 1.	46
17	Formato del mensaje RREQ en el protocolo de enrutamiento M a 1.	48
18	Formato del mensaje RREP en el protocolo de enrutamiento M a 1	49
19	Formato del mensaje PETICION del protocolo de enrutamiento M a 1.	50

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		Página
20	Formato de los mensajes DATOS, ERROR_LOGGER y ACK en el protocolo de enrutamiento M a 1.	50
21	Formato del mensaje HOLA AISLADO/INTEGRACION en el protocolo de enrutamiento M a M.	52
22	Formato del mensaje Respuesta_HOLA en el protocolo de enrutamiento M a M.	53
23	Formato del mensaje RREQ en el protocolo de enrutamiento M a M.	55
24	Formato del mensaje RREP en el protocolo de enrutamiento M a M.	57
25	Formato del mensaje PETICION en el protocolo de enrutamiento M a M	58
26	Formato del mensaje ERROR_RUTA en el protocolo de enrutamiento M a M.	58
27	Formato de los mensajes de DATOS, ERROR_LOGGER y ACK en el protocolo de enrutamiento M a M.	59
28	Esquema simplificado de un temporizador.	60
29	LFSR del polinomio primitivo $x^3 + x + 1$.	63
30	LFSR del polinomio primitivo $x^6 + x + 1$.	64
31	Diagrama de flujo de la rutina al servicio de la interrupción que genera al RTC.	67
32	Lectura con el osciloscopio del tiempo generado por el RTC programado en la interfaz inalámbrica.	67
33	Diagrama del funcionamiento generalizado del programa principal del protocolo de enrutamiento M a 1.	69
34	Diagrama de flujo de la rutina de atención a la interrupción.	70

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		Página
35	Diagrama del funcionamiento generalizado del programa principal del protocolo de enrutamiento por trayectorias múltiples a múltiples nodos (M a M).	72
36	Diagrama de la función “ <i>Obteniendo_Vecinos</i> ” del protocolo de enrutamiento M a M.	74
37	Diagrama de la función “ <i>EnviaHolaPeriodico</i> ” y “ <i>RatificarVecinos</i> ” del protocolo de enrutamiento M a M.	74
38	Diagrama de la función “ <i>Procesapaquetesradio</i> ” del protocolo de enrutamiento M a M.	75
39	Ubicación, identificación y distancia entre nodos en la que será la Red Inalámbrica de Sensores de Deformación del Valle de Mexicali (RISDEFVM)	77
40	Valores teóricos de intensidad de potencia recibida con respecto a la distancia utilizando el modelo de propagación de espacio libre	79
41	Valores teóricos de intensidad de potencia recibida con respecto a la distancia utilizando el modelo de propagación de dos rayos con altura de las antenas de 4m.	80
42	Valores teóricos de intensidad de potencia recibida con respecto a la distancia utilizando el modelo de propagación de dos rayos con altura de las antenas de 8m.	80
43	Valores teóricos de intensidad de potencia recibida atenuada con respecto a la distancia utilizando el modelo de propagación de espacio libre	82
44	Azotea de la División de Física Aplicada del CICESE	83
45	Valores de intensidad de potencia recibida medidos con el Analizador de Espectros	83
46	Valores de intensidad de potencia recibida medidos con el radio AC4790-1000.	85

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		Página
47	Red Inalámbrica de Sensores de Deformación del Valle de Mexicali implementada en la azotea de la DFA.	86
48	Ubicación de las interfaces inalámbricas en la zona de pruebas.	86
49	Algoritmo implementado en la interfaz inalámbrica del Nodo de Acceso para probar el funcionamiento del protocolo de enrutamiento M a 1.	89
50	Trayectorias formadas por el protocolo de enrutamiento M a 1 después de difundir el mensaje RPRI.	91
51	Mensajes RREP recibidos en el Nodo de Acceso después de llevarse a cabo la difusión del mensaje RREQ con el protocolo de enrutamiento M a 1	93
52	Paquetes de DATOS recolectados por el Nodo de Acceso en la prueba del funcionamiento del protocolo de enrutamiento M a 1.	94
53	Trayectorias formadas después de difundir un mensaje RPRI en el protocolo de enrutamiento M a 1 con el Nodo Sensor V1 desconectado.	96
54	Enlaces inalámbricos entre los nodos de la RISDEFVM al termino de la primera fase del protocolo de enrutamiento M a M.	99
55	Mensajes RREP recibidos en el Nodo de Acceso después de llevarse a cabo la difusión del mensaje RREQ con el protocolo de enrutamiento M a M.	101
56	Trayectorias formadas al solicitar camino hacia el Nodo Sensor IV utilizando el protocolo de enrutamiento M a M.	102
57	Trayectoria utilizada en la recolección de paquetes del Nodo Sensor IV cuando falla la trayectoria primaria utilizando el protocolo de enrutamiento M a M.	104
58	Trayectorias formadas al solicitar camino hacia el Nodo Sensor RCP utilizando el protocolo de enrutamiento M a M.	105

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		Página
59	Potencia de transmisión empleada por los Nodos Sensores para resolver la problemática de aislamiento del Nodo Sensor RCP utilizando el protocolo de enrutamiento M a M.	106
60	Lectura del tiempo y el consumo de corriente del tercer modelo de interfaz inalámbrica transmitiendo paquetes a mínima potencia.	120
61	Diagrama de componentes del primer modelo de interfaz inalámbrica	124
62	Negativo del PCB del primer modelo de interfaz inalámbrica	124
63	Diagrama de componentes del segundo modelo de interfaz inalámbrica	125
64	Negativo del PCB del segundo modelo de interfaz inalámbrica	126
65	Negativo del PCB del tercer modelo de interfaz inalámbrica	126
66	Diagrama de componentes del tercer modelo de interfaz inalámbrica	127

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla</i>		Página
I	Diferencias entre WSNs y Redes Inalámbricas Ad-Hoc convencionales.	19
II	Características de los microcontroladores empleados en los modelos de interfaz inalámbrica.	29
III	Características generales del radio de gran alcance AC4790-1000	33
IV	Secuencia generada por el polinomio x^3+x+1	63
V	Comandos empleados para interactuar con la memoria EEPROM del radio AC4790-1000	73
VI	Tablas de Nodos Vecinos formadas por los nodos sensores en la prueba del funcionamiento del protocolo de enrutamiento M a 1.	92
VII	Tablas de Destinos formadas por los nodos sensores en la prueba del funcionamiento del protocolo de enrutamiento M a 1.	92
VIII	Tablas de Nodos Vecinos formadas por los nodos sensores en la prueba del funcionamiento del protocolo de enrutamiento M a M.	100
IX	Tablas de Destinos formadas por los nodos sensores en la prueba del funcionamiento del protocolo de enrutamiento M a M.	102
X	Ventajas y Desventajas entre los protocolos de enrutamiento por múltiples trayectorias implementados	107
XI	Corriente medida y potencia calculada de los diferentes modelos de interfaz inalámbrica.	119
XII	Consumo de potencia de las interfaces inalámbricas a diferentes potencias de transmisión de datos	123
XIII	Tabla de valores calculados de intensidad de señal recibida utilizando el modelo de espacio libre.	128
XIV	Tabla de valores medidos de intensidad de señal recibida utilizando el Analizador de Espectros.	128

LISTA DE TABLAS (continuación)

Tabla		Página
XV	Tabla de valores medidos de intensidad de señal recibida utilizando el Radio AC4790-1000.	129
XVI	Tabla de valores medidos de intensidad de señal recibida en el enlace Telemática-Cerro Punta Banda.	129
XVII	Tabla de valores medidos de intensidad de señal recibida en el Valle de Maneadero.	129

I.1 Antecedentes

Debido a los avances en la muy alta integración de dispositivos electrónicos, actualmente es posible encontrar dispositivos de pequeño tamaño que realizan en su interior el análisis y procesamiento de diferentes señales eléctricas que representan una medida de algún fenómeno físico (temperatura, humedad, nivel de ph, sonido, vibraciones, etc). Al contar estos dispositivos con las condiciones necesarias (interfaces de radio, protocolos de enrutamiento) para transportar la información de estas variables físicas de forma inalámbrica hacia algún usuario de interés o hacia otro dispositivo en particular, es posible formar una red compuesta por un gran número de estos, los cuales se encuentran distribuidos de una manera autónoma sobre una región determinada. Al conjunto de estos dispositivos se les ha llamado como Redes Inalámbricas de Sensores (WSN-Wireless Sensor Networks).

El desarrollo de estas redes originalmente fue impulsado para aplicaciones militares [Sohraby *et al*, 2007], sin embargo también son aplicadas en muchas otras áreas tales como: la medicina, la industria, las telecomunicaciones y la ecología.

En esta última área, las Redes Inalámbricas de Sensores que son utilizadas para monitorear y recolectar información de volcanes [Werner G.*et al*, 2006], ríos, flora y fauna de una región, bosques, lagos, etc. [Kuorilehto *et al*, 2005], se encuentran desplegadas en áreas extensas (km²), empleando en algunos casos un gran número (cientos a miles) de estos pequeños dispositivos y en otros se realizan adaptaciones de éstos a tarjetas de

comunicación inalámbrica de gran potencia, permitiendo establecer comunicación con otras a kilómetros de distancia.

Las características que se presentan en este tipo de redes tales como el monitoreo y la recolección de información de manera remota, sin esfuerzo y en un tiempo relativamente pequeño, ha llevado a los investigadores de la Red de Deformaciones del Valle de Mexicali (RDEFVM) del Departamento de Sismología del CICESE, a plantearse como necesidad urgente el integrar éstas a su nodos, dejando de realizar manualmente el “ordeñamiento” de tarjetas de adquisición de datos mediante visitas de campo, lo cual origina hoy en día costos y retraso en el análisis de los datos.

Una solución al problema de recolección de información en la RDEFVM fue dada por Cortez Vázquez [2006] con su tesis titulada “Diseño e implementación de un Red Inalámbrica de Área Amplia” en donde desarrolló un prototipo de un sistema de comunicación inalámbrico específico, el cual consistió de una interfaz inalámbrica¹, una interfaz gráfica y una página WEB. Sin embargo el enrutamiento correcto de los datos en dicho sistema depende en gran medida del buen funcionamiento de todos los nodos, ya que no cuenta con un protocolo de enrutamiento auto configurable que le permita responder a los cambios topológicos de la red.

I.2 Planteamiento del Problema.

Actualmente la RDEFVM esta formada con 9 nodos desplegados en un área geográfica de aproximadamente 400km², de los cuales se pretende que en la primera fase de instalación del sistema de comunicación inalámbrico, 7 de estos cuenten con interfaces inalámbricas. Las grandes distancias entre nodos que existen en la red (figura 1), implica que antes de que se instale el prototipo en el Valle de Mexicali, sea necesario:

¹Es un circuito electrónico que esta formado por un microcontrolador y una tarjeta de comunicación inalámbrica que transmite con gran potencia y que es utilizado para que los nodos en la RDEFVM establezcan comunicaciones en modo Ad-hoc.

- Implementar el sistema en un ambiente apropiado que permita emular a la RDEFVM, para así realizarle al sistema una serie de pruebas (agregando y desconectando nodos en la red, tiempo de recolección de paquetes, etc.) con protocolos de enrutamiento auto configurables.
- Considerar aspectos de propagación (estimación de intensidad de potencia recibida mediante un modelo de pérdidas por propagación y/o pruebas de campo) para la correcta instalación (altura y ganancia de las antenas, cables, conectores, etc) del prototipo de comunicación inalámbrica construido.

Además uno de los problemas que suele presentarse en redes inalámbricas con pocos nodos cuyos transmisores no cuentan con un ajuste automático de la potencia, es la existencia de nodos aislados, situación ocasionada por la falla de un nodo que le proporciona a otro el único camino para integrarse a la red. Para abatir este problema es indispensable diseñar un protocolo de enrutamiento que cuente con un mecanismo que le permita al nodo conocer cuando se encuentra aislado y considere el modificar su potencia de transmisión para tratar de salir de su condición de aislamiento.



Figura 1: Red de Sensores de Deformación del Valle de Mexicali (RDEFVM).

I.2.1 Características y parámetros de calidad de servicio que se demandan de la RDEFVM

Al agregar un dispositivo electrónico que permita a los nodos de la RDEFVM establecer comunicación inalámbrica en modo Ad-Hoc, se forma una Red Inalámbrica de Sensores de Área Amplia (Wide Area Wireless Sensor Networks-WAWSN). Ésta a diferencia de las WSNs convencionales, maneja características particulares como son:

- Los nodos en la red no se encuentran limitados en energía, debido a que se cuenta con un panel solar y batería recargable. A su vez no se encuentran limitados en memoria, ya que pueden almacenar hasta 3 meses de información con una tasa de muestreo de 4 minutos.
- No existe restricción en el tiempo de entrega de los datos, ya que en el presente se realiza la recolección en periodos de meses.
- La red es de pequeña escala, con *Nodos Sensores* estáticos que se encuentran desplegados de manera determinística. Así también, solo se tiene un *Nodo de Acceso* que recolecta la información de los sensores.
- La distancia entre nodos es del orden de kilómetros.

Dentro de los Parámetros de QoS que se demandan de la RDEFVM están los siguientes:

- Debe asegurar la entrega de todos los datos que se recolecten de los Nodos Sensores al investigador (confiable).
- La nodos en la red deben tener la capacidad de auto organizarse respondiendo a los cambios en la topología de la misma, debido a fallas o cambios en la ubicación de los nodos (adaptable).
- La interfaz inalámbrica debe ser capaz de comunicarse con cualquier tipo de tarjeta de adquisición de datos (Flexible), debido a los diferentes equipos utilizados en los nodos.
- El protocolo de enrutamiento que se utilice en la red deben soportar el crecimiento de la red (Escalable).

I.2.2 Trabajo relacionado.

En Cortez Vázquez [2006] se propuso un sistema de comunicación inalámbrico que da solución a la necesidad de recolectar de manera remota la información almacenada en las tarjetas de adquisición de datos CR10X instaladas en la RDEFVM, siendo el alcance de esta propuesta el siguiente:

- Se diseñó y construyó una interfaz inalámbrica que transmite con gran potencia a la cual se le dio la capacidad de enrutar paquetes por medio de un microcontrolador.
- Se realizaron y programaron en el microcontrolador un algoritmo para la obtención de datos de una tarjeta de adquisición CR10X de Campbell Scientifics, un algoritmo de procesamiento de paquetes, así como un algoritmo de enrutamiento basado en tablas estáticas con rutas fijas que permite transportar la información de un *Nodo Sensor* hacia la estación base (*Nodo de Acceso*). Este último tiene la desventaja de que los nodos no pueden responder a los cambios en la topología de la red, siendo la única forma, el volver a programar en el microcontrolador el código con las modificaciones.
- Se escribió un protocolo de enrutamiento por trayectorias múltiples (M a 1), tomando como base el protocolo dado por Lou [2005], al cual se le agregó un mecanismo de actualización de rutas, como el que se tiene en el protocolo de enrutamiento AODV.
- Se realizó una Interfaz gráfica en Labview para el control y recolección de los datos y una pagina WEB para la recolección remota de los datos a través de Internet.

Dentro de las limitantes que se detectaron en esta propuesta se tiene lo siguiente:

- Al construirse una sola interfaz inalámbrica, el funcionamiento de la red inalámbrica de sensores de área amplia no fue probado.
- Se encontraron problemas relacionados con la fuente de alimentación y con los puertos de comunicación.

- El protocolo de enrutamiento que ofrece la posibilidad de que los *Nodos Sensores* auto configuren sus tablas de enrutamiento requiere de modificaciones para que pueda ser integrado a las interfaces inalámbricas. Además, es necesario un nuevo programa en el *Nodo de Acceso* que pueda enviar las secuencias que se requieren para el correcto funcionamiento del sistema con el protocolo de enrutamiento por trayectorias múltiples M a 1.
- La interfaz gráfica que se encuentra instalada en el *Nodo de Acceso* y que se encarga de recolectar la información de las tarjetas de adquisición de datos, cuenta con trayectorias definidas hacia los *Nodos Sensores*, así que no puede actualizar automáticamente las rutas cuando la topología de la red cambia.

I.3 Objetivos.

Analizando las limitantes heredadas del sistema de comunicación inalámbrico propuesto y tomando en cuenta sus aportes, el objetivo general de esta tesis es:

La implementación de una Red Inalámbrica de Sensores de Área Amplia en un ambiente que permita probar el funcionamiento de protocolos de enrutamiento que proporcionen los parámetros de Calidad de Servicio que se demandan en la RDEFVM.

Para conseguir lo antes mencionado se plantearon objetivos específicos, como los que a continuación se presentan:

- Rediseño y construcción de un nuevo modelo de interfaz inalámbrica que trate de superar las limitantes del anterior.
- Implementación de la WAWSN en un ambiente de laboratorio.
- Adaptación del protocolo de enrutamiento por trayectorias múltiples (M a1) con mecanismo de actualización de rutas en el nuevo modelo de interfaz inalámbrica.

- Diseño y programación de un protocolo de enrutamiento alternativo que cuente con un mecanismo que le permita al nodo de la WAWSN conocer cuando se encuentra aislado y considere el modificar su potencia de transmisión para tratar de salir de su condición de aislamiento.
- Prueba del funcionamiento de ambos protocolos en la WAWSN implementada.

I.4 Organización de la tesis.

En este primer capítulo se describieron los alcances y limitaciones de la tesis de Cortez Vázquez [2006] y se plantearon las actividades que necesitan ser desarrolladas antes de instalar la red inalámbrica de sensores en el campo de acción.

En el capítulo II se presentan las características, similitudes y diferencias entre las redes inalámbricas en modo ad-hoc y las redes inalámbricas de sensores.

En el capítulo III se trata todo lo relacionado con el diseño y la implementación de nuevos modelos de interfaz inalámbrica, se mencionan las características de los dispositivos empleados, así como las ventajas que proporcionan.

En el capítulo IV se muestra una clasificación de protocolos de enrutamiento para redes inalámbricas de sensores y se describen las diferentes fases que forman a los protocolos de enrutamiento que han sido diseñados para dar solución a las necesidades que se demandan en la RDEFVM.

El capítulo V explica como se implementaron en los microcontroladores de las interfaces inalámbricas, los protocolos de enrutamiento y los mecanismos de generación de retardos pseudoaleatorios y reloj de tiempo real (RTC), los cuales son ampliamente utilizados en las fases que componen a los protocolos de enrutamiento diseñados.

El capítulo VI muestra que parámetros fueron tomados en cuenta para implementar la Red Inalámbrica de Sensores de Área Amplia en condiciones de laboratorio. Se describen las pruebas de funcionamiento realizadas a la WAWSN con los protocolos de enrutamiento, así como los resultados obtenidos.

Finalmente en el capítulo VII se mencionan las conclusiones de este trabajo de investigación y las propuestas de trabajo a futuro.

En los Anexos se presenta un análisis comparativo del consumo de potencia con base a mediciones realizadas a los diferentes modelos de la interfaz inalámbrica. Así también, se muestran los diagramas y mascarillas de los circuitos impresos utilizados en la construcción de las interfaces inalámbricas.

Redes Inalámbricas

En los últimos años, las redes inalámbricas han venido a resolver la necesidad de comunicación entre terminales en lugares donde no es económico o físicamente posible implementar una infraestructura de red cableada. Dentro de las dos principales topologías de redes inalámbricas, existen las Redes Inalámbricas de infraestructura, en las cuales un elemento central es el encargado de controlar el flujo de la información, brindando soporte y acceso a los demás elementos de la red. Ejemplos de este tipo de redes son las que dan soporte a la telefonía móvil y las que proporcionan acceso a internet inalámbrico en universidades, aeropuertos, café internet, etc., llamadas redes inalámbricas de área local (*Wireless Local Area Network, WLAN*). Otra topología de Redes Inalámbricas son las formadas en modo Ad-Hoc, las cuales debido a su versatilidad existen numerosas aplicaciones alrededor de ellas.

II.1 Redes Inalámbricas Ad-Hoc.

Las redes inalámbricas en modo Ad-Hoc son una colección de dos o más dispositivos que tienen la capacidad de intercambiar información entre de estos al estar equipados con interfaces de radio y protocolos de comunicación. Este tipo de redes ofrecen una gran flexibilidad en la transferencia de datos, debido a que los elementos que la componen no requieren de una infraestructura de red cableada, ni de administración centralizada, pudiendo ser fijos o móviles. Además, estos elementos proporcionan los servicios de enrutamiento hacia aquellos dispositivos con los cuales no se tiene una conexión inalámbrica directa, utilizando nodos intermedios.

II.1.1 Características de las Redes Inalámbricas Ad-Hoc.

Algunas otras características de este tipo de redes son las siguientes:

- a) **Redes heterogéneas:** Una red inalámbrica Ad-Hoc típica está compuesta de dispositivos heterogéneos (figura 2), tales como computadoras personales, PDA's, teléfonos celulares, impresoras, etc. Esta característica es fundamental para adecuarse a las necesidades de redes de 4ª generación, en donde los dispositivos inalámbricos se integrarán con la red cableada de manera transparente a las aplicaciones [Ramírez Mondragón, 2007].

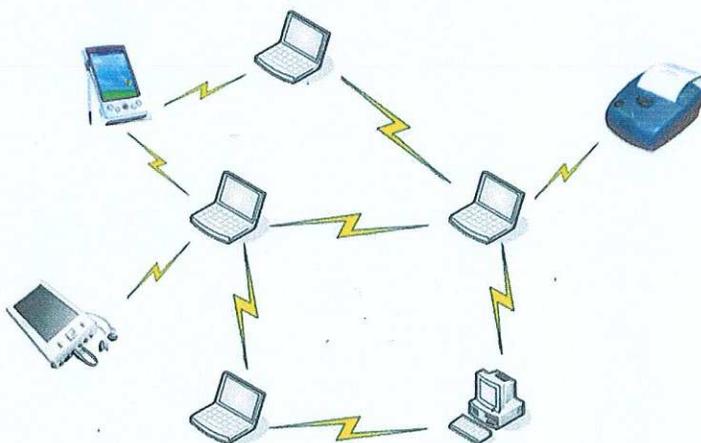


Figura 2: Red Inalámbrica Ad-Hoc

- b) **Redes relativamente dispersas:** Los nodos en este tipo de redes por lo general se encuentran dispersos en una determinada área geográfica, ya que estas son formadas sin un orden preestablecido. En la mayoría de las ocasiones, esta situación provoca que un nodo no pueda comunicarse de forma directa con todos los demás nodos que forman la red, por lo que para resolver esta problemática se utilizan esquemas de comunicación multisalto.

- c) **Comunicaciones de baja calidad:** La comunicación sobre un canal inalámbrico es menos confiable que en un canal cableado, debido a que la calidad de la comunicación está influenciada por factores como: la presencia de obstáculos, interferencia con otras redes, condiciones climáticas, etc. Por lo que en este tipo de redes se presentan comunicaciones de baja calidad cuando existen variaciones dramáticas en el canal inalámbrico.
- d) **Escalabilidad:** En algunos escenarios, las redes inalámbricas Ad-Hoc pueden estar compuestas de una gran cantidad de nodos. Esto significa que los protocolos utilizados para establecer la red Ad-Hoc deben ser capaces de operar adecuadamente cuando estén formadas por un gran número de nodos.
- e) **Movilidad:** En una red Ad-Hoc típica, la mayoría de los elementos que la componen son móviles, y cuando todos estos lo son, se les llama Redes Móviles Ad-Hoc (Mobile Ad Hoc Networks - MANET). Este tipo de redes manejan características particulares como son:
1. **Nodos Autónomos:** Todos los nodos que conforman la MANET, que por lo regular son computadoras personales móviles, son autónomos debido a que estos pueden realizar tareas de enrutamiento y de procesamiento de datos.
 2. **Topología Dinámica de la red:** Las Redes Móviles Ad-Hoc se forman de manera dinámica, agregando o eliminando dispositivos de la red a medida que los usuarios entran o salen de ella, por lo tanto las rutas hacia diversos nodos pueden cambiar sin previo aviso, afectando la topología de la red.
 3. **Nodos con capacidades limitadas:** Los nodos en este tipo de redes son dispositivos con limitaciones de energía y ancho de banda ya que comparten el medio inalámbrico y son alimentados por baterías recargables. Es por esto que se debe hacer uso de algoritmos de enrutamiento que permita a estos nodos optimizar sus recursos.

II.1.2 Aplicaciones de las Redes Inalámbricas Ad-Hoc.

Existen diversas aplicaciones para este tipo de redes inalámbricas Ad-Hoc algunas de estas son:

- **Entrega de información particularizada de los servicios de un Museo hacia sus visitantes:** UbiqMuseum es una aplicación en donde se proporciona información referente a las obras de arte que el visitante está observando en un Museo. El usuario puede acceder a esta información por medio de dispositivos móviles como PDAs, teléfonos celulares, computadoras personales, etc., los cuales se conectan a la red utilizando tecnología Bluetooth [Cano J.C *et al*, 2006].
- **Acceso a Internet desde cualquier lugar:** Hoy en día es posible acceder a internet en áreas públicas como aeropuertos, centrales de autobuses, centros comerciales, etc., utilizando dispositivos portátiles de otros usuarios que sirven como puentes inalámbricos, pudiendo así extender el acceso a internet a toda un área urbana.
- **Comunicación entre cuerpos de rescate en zonas de desastre.** Cuando se presentan fenómenos naturales como terremotos, inundaciones, tornados, etc., la mayoría de la infraestructura de comunicaciones (cableado de líneas telefónicas, estaciones base de red celular, y más) quedan destruidas. Es ahí en donde las redes inalámbricas Ad-hoc, por la rapidez y sencillez en que se despliegan, permite a los equipos de rescate (bomberos, policía, equipo medico, voluntarios y otros) tener una coordinación exitosa entre ellos, sin la necesidad de restablecer la infraestructura de comunicación fija, para asistir a los heridos que han dejado estos desastres.
- **Operaciones en Campo de Batalla.** En el futuro las operaciones en el campo de batalla, serán realizadas por agentes autónomos terrestres y aéreos no tripulados. Los cuales llevarán a cabo las acciones de vigilancia, ataque, monitoreo, evaluación de daños, búsqueda, rescate y otras operaciones tácticas.

II.2 Redes Inalámbricas de Sensores.

Las Redes Inalámbricas de Sensores (WSN-Wireless Sensor Networks) son un tipo particular de redes en modo Ad-Hoc, las cuales consisten generalmente de dispositivos electrónicos de pequeño tamaño con capacidades de sensado, procesado y comunicaciones inalámbricas que le permiten al administrador de la red, monitorear y recolectar información del entorno en donde se encuentran desplegadas. En este tipo de redes se manejan elementos clave como los que a continuación se mencionan:

- a) **Área de Cobertura a Sensar.-** Esta es el área de cobertura geográfica en donde se encuentra desplegada la WSN.

- b) **Nodo Sensor.-** Son dispositivos ligeros y de pequeño tamaño a los cuales se les ha encomendado dos tareas principales. Una de ellas es la de interactuar con el medio ambiente (sensando o actuando); y la otra es la de reportar los datos sensados, transmitiéndolos hacia otros nodos en la WSN. De estas dos tareas la que esta relacionada con las actividades de comunicación, es la que consume la mayor parte de la potencia del *Nodo Sensor*. Esta disparidad entre el costo de la comunicación y el de computo es reportada en [Pottie G. J y Kaiser W, 2000] donde se ha estimado que 3000 instrucciones pueden ser ejecutadas por el mismo costo de transmitir un bit de un dato en una distancia de 100 m. Es por esto que el desarrollo de protocolos de comunicación que manejan de la mejor manera los recursos del *Nodo Sensor*, es un requisito fundamental para el desarrollo de una WSN confiable y robusta. La estructura interna de este nodo la integran diferentes unidades, como son:
 - **Unidad de Potencia.-** Por lo general esta unidad esta formada por baterías alcalinas o de litio, las cuales han sido especialmente diseñadas para este tipo de aplicaciones. Existen casos en donde esta unidad esta formada por una batería que es recargada por medio de un panel solar, lo que sin duda incrementa el tiempo de vida del *Nodo Sensor*.

- **Unidad de procesado.-** Este es el elemento programable del *Nodo Sensor*, es donde se lleva a cabo el análisis de la información recolectada y el manejo del enrutamiento de los datos. La integran un microcontrolador, una memoria de programa y una memoria de datos, utilizada por lo regular para almacenar temporalmente la información recolectada.
 - **Unidad de Transmisión.-** Esta unidad está formada por un transmisor, un receptor y una antena. Para que pueda comunicarse con otro nodo de forma directa, ambos deben manejar características similares de capa física y de enlace de datos. La forma en que transmiten la información (IR-Infrarrojos, RF- Radio Frecuencia, Ondas Acústicas) viene dada por el fabricante y está influenciada por el propósito del *Nodo Sensor*.
 - **Unidad de Sensado.-** Dependiendo de lo que se quiera medir, por ejemplo luz, temperatura, vibraciones, inclinación, pH, etc., la unidad de sensado convertirá una señal analógica a digital antes de ser enviada a la unidad de procesado.
- c) **Nodo de Acceso.-** Este es un nodo que por lo regular es fijo y no se encuentra limitado en energía y capacidades de cómputo, encargándose de recolectar toda la información generada por los nodos sensores. Esta información es llevada hacia un usuario externo por lo regular mediante una conexión a internet o a otro tipo de redes como son WiFi, o 3G.
- d) **Manejador de la WSN.-** Es una interfaz gráfica realizada en un lenguaje de programación de alto nivel, la cual le permite al usuario interactuar con la WSN de manera sencilla.

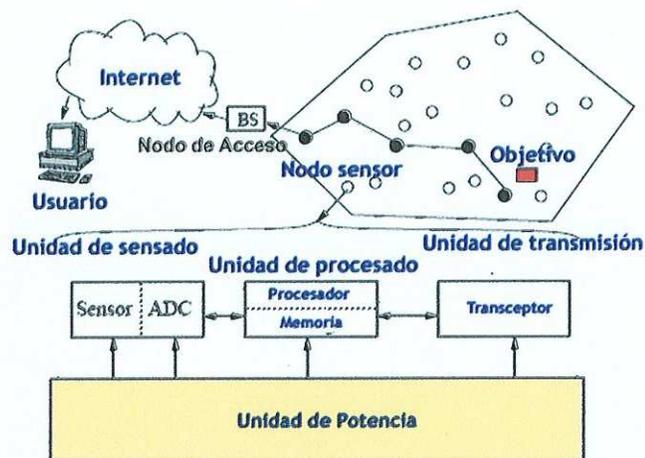


Figura 3: Red Inalámbrica de Sensores.

II.2.1 Características de las Redes Inalámbricas de Sensores.

Entre las características que poseen este tipo de redes se tienen las siguientes:

- a) **Son redes homogéneas:** Una WSN está compuesta típicamente de nodos con las mismas propiedades en las unidades de procesado y de transmisión. Aunque en casos especiales se puede tener en la misma red nodos que poseen mayor capacidad de procesamiento y de potencia, lo cual permite aumentar el área de cobertura de la red.
- b) **Son Estacionarias o Cuasi-Estacionarias:** Por lo regular este tipo de redes son estáticas, ya que se dedican exclusivamente a monitorear el entorno en donde se encuentran desplegadas. También existen aplicaciones en donde el objetivo a monitorear es móvil, tal y como sucede en las WSN que se encargan de monitorear especies de animales en sus hábitats naturales.
- c) **Están relativamente dispersas:** Esta característica es común en las redes inalámbricas Ad-Hoc. Una red inalámbrica de sensores está formada típicamente por nodos que están dispersos en una región geográfica relativamente grande, así que la comunicación directa hacia todos los nodos en la red no es posible.

- d) **Son redes muy densas:** Típicamente el número de nodos desplegados en una WSN es mucho mayor que en las MANETs, ya que al ser nodos muy limitados de recursos, necesitan de una gran cantidad de estos para monitorear una región determinada.

En el momento en que se despliegan este tipo de redes inalámbricas, surgen sus limitaciones (energía, cómputo, memoria, número de elementos para cubrir áreas extensas, etc.), que están íntimamente ligadas a las características de estas redes. El tratar de superar estas limitaciones son temas de investigación en alianzas, universidades y fabricantes que se dedican al desarrollo y creación de este tipo de redes alrededor del mundo. Al contrarrestar estos problemas se espera obtener el máximo desempeño de estas redes. Algunos de estos temas son:

- **Conservación de energía:** La reducción del consumo de energía de los nodos es importante en las redes inalámbricas Ad-Hoc, pero en las WSN es todavía más importante, dado que al ser los nodos sensores de reducido tamaño, la batería que poseen tiene poca capacidad ocasionando que la energía disponible sea muy limitada. Es así que uno de los objetivos principales de diseño es usar esta limitada cantidad de energía lo más eficientemente posible, mediante algoritmos de enrutamiento adecuados y técnicas de agregación de los datos.
- **Comunicaciones de baja calidad:** Las redes de sensores son a menudo desplegadas en ambientes en donde tienen que operar bajo condiciones climáticas extremas. En esas situaciones, la calidad de la radiocomunicación podría ser extremadamente pobre, es por eso que dichas redes manejan tecnologías de radiofrecuencia que contrarresta los efectos nocivos del canal.
- **Operación en ambientes hostiles:** En muchos escenarios donde se tienen condiciones ambientales críticas, es esencial que la estructura física de los nodos sensores sea cuidadosamente diseñada, desde el tipo de componentes utilizados hasta la carcasa que lo protegerá de estos ambientes. Además, los protocolos que se

encargan de la operación de la red deben proporcionar la capacidad de reaccionar ante fallas de nodos sensores, situación que se vuelve muy probable en estos ambientes.

- **Cómputo obligado de recursos:** Los protocolos para las redes de sensores deben esforzarse para proveer los parámetros deseados de Calidad y Servicio a pesar de los pocos recursos disponibles.
- **Escalabilidad:** Los algoritmos de enrutamiento utilizados en las WSN deben considerar explícitamente la escalabilidad cuando se encuentran en la fase de diseño, debido a que estas redes son formadas por decenas a cientos de nodos.

II.2.2 Aplicaciones de las Redes Inalámbricas de Sensores.

Las aplicaciones de este tipo de redes son en la actualidad muy diversas, llegando a cubrir áreas como la medicina, la agricultura, el medio ambiente, aplicaciones militares, vigilancia, detección del tráfico en autopistas, juguetes y otras [Baronti *et al* 2006].

En el campo de la medicina son usadas para monitorear parámetros fisiológicos como los latidos del corazón, la presión arterial, el nivel de glucosa de un paciente, reportando al hospital estos parámetros cuando representan un riesgo mortal para los pacientes.

En la Agricultura, son utilizadas para monitorear las condiciones climáticas de diferentes áreas de cultivo y con la información generada de estos sensores se calcula el agua o químicos necesarios para obtener buenas cosechas [Sohraby *et al*, 2007]. También pueden ser utilizadas para monitorear bosques, ríos o áreas protegidas, dando oportunidad de reaccionar ante posibles incendios, inundaciones o tala inmoderada. [Steere D.C. *et al*, 2000].

Otras posibles aplicaciones que recientemente se han experimentado son el monitoreo de especies de animales, recolectando datos acerca de sus hábitats, población y ubicación. Este tipo de redes han permitido obtener datos mas confiables debido a que se recolecta

información en largos periodos de tiempo y ya no se tiene presencia humana que interfiera con las condiciones de vida de estas especies.[Mainwaring A. *et al*, 2002].

En aplicaciones militares, las redes de sensores son desplegadas detrás de las líneas enemigas y con estas se pueden observar los movimientos y/o la presencia de tropas, recolectando información geográfica del área de despliegue.

Estas son algunas de las numerosas aplicaciones que se les ha dado a las redes inalámbricas de sensores, existen diversos artículos y libros en donde se tratan a más profundidad aspectos tales como la arquitectura, los protocolos de enrutamiento así como evaluaciones realizadas de estas redes en diferentes entornos.

II.3 Diferencias entre las WSN y Redes Inalámbricas Ad-Hoc

En una forma muy general las principales diferencias entre una Red Inalámbrica en modo Ad-Hoc típica y una Red Inalámbrica de Sensores están determinadas por la arquitectura (hardware) de los propios nodos y la topología de la red. Algunas de las más importantes diferencias son las siguientes [Qiangfeng J. y Manivannan D.,2004]:

- El número de nodos sensores en una WSN puede ser de varios órdenes de magnitud superior al de nodos en una red Ad-Hoc. Lo cual tiene como consecuencia que no se utilice las técnicas de direccionamiento tradicionales como las usadas en redes IP.
- Las WSN son principalmente empleadas para recolectar información de un área geográfica mientras las redes inalámbricas Ad –Hoc son diseñadas para el cómputo distribuido.
- Las redes de sensores tienen normalmente una gran densidad de nodos por unidad de superficie. Los algoritmos proactivos podrían no ser tan adecuados con una densidad de nodos tan alta. Los intercambios periódicos de tablas de encaminamiento o estados

de enlace tendrían un coste en ancho de banda considerable por lo que no son aptos para ser utilizados en WSN densas.

- Los nodos en una WSN son más propensos a fallos debido a que el tiempo de vida de ellos esta en función de la baterías que los alimentan, que por lo regular no es posible recargarlas. En cambio los nodos que conforman una red inalámbrica Ad-Hoc típica, suelen ser computadoras portátiles o de bolsillo e incluso teléfonos móviles, los cuales tienen una fuente de alimentación recargable y que se encuentra administrada por el propio usuario.
- El ancho de banda en una WSN suele ser mucho más pequeño que en una red inalámbrica Ad-Hoc. Por lo que algunas aplicaciones como la transmisión de video en tiempo real y el manejo de protocolos de enrutamiento cuyos mensajes de control tengan un tamaño elevado pueden no ser aplicables.
- La topología de una red de sensores cambia con frecuencia y no por el movimiento de los nodos como sucede en las redes inalámbricas Ad-Hoc convencionales, sino más bien por el reducido alcance de las interfaces de radio de los nodos sensores, las variaciones en el medio ambiente en donde se encuentran desplegadas y especialmente la energía que tenga disponible en el momento de realizar la comunicación con otros nodos.

En la Tabla I se muestran algunas otras diferencias entre este tipo de redes inalámbricas.

Tabla I. Diferencias entre WSNs y Redes Inalámbricas Ad-Hoc convencionales.

	WSNs	Redes Inalámbricas Ad Hoc
Número de nodos	Grande, cientos a miles.	Pequeños a moderados
Densidad	Alta	Relativamente baja
Redundancia de los datos	Alta	Baja
Fuente de Alimentación	No recargable; irremplazable	Recargable y/o baterías reemplazables.
Tasa de transmisión	Baja; 1-100kb/s	Alta
Movilidad	Baja	Pueden tener alta movilidad
Patrón de trafico	Predominantemente unidireccional; Nodos sensores a Nodo de Acceso	Bidireccional; flujo extremo a extremo
Transmisión de paquetes	Múltiples a uno: centrado en datos	Centrado en direcciones
Tiempo de trabajo activo	Podría ser menor a 1%	Alto

Rediseño de la interfaz inalámbrica

En este capítulo se tratarán aspectos del diseño y la construcción de dos prototipos de interfaces inalámbricas que serán utilizadas para que los nodos de la RDEFVM puedan establecer comunicación a grandes distancias en modo Ad-hoc. Esto con la finalidad de que los usuarios de la red puedan recolectar la información de tarjetas de adquisición de datos. Los prototipos diseñados como se podrá observar, son flexibles ya que al disponer de múltiples puertos de comunicación, es posible conectar de forma simultánea equipos tales como tarjetas de adquisición de datos, sensores, computadoras personales, etc.,

III.1 Nodo Sensor de la Red Inalámbrica de Sensores de Área Amplia.

Los módulos que componen a un *Nodo Sensor*, tal como se comentó en el capítulo anterior, se forman a partir de una unidad de transmisión (radio), unidad de procesamiento (microcontrolador y memoria), unidad de sensado (sensores y convertidores analógico digital) y una fuente de alimentación. En la actualidad los nodos de la RDEFVM cuentan con sensores que miden la separación, la ruptura y el hundimiento de placas tectónicas de la tierra. Dichos sensores se encuentran conectados a una tarjeta de adquisición de datos CR10X de la compañía *Campbell Scientific* y a tarjetas de la compañía GEOKON, las cuales se encargan de almacenar las lecturas tomadas por los sensores. Además, se cuenta con un panel solar y una batería recargable que proporciona energía de forma ininterrumpida a los sensores y a la tarjeta de adquisición de datos. En la figura 4 se puede observar la condición actual de un nodo de la RDEFVM.

Al agregar el circuito electrónico (Interfaz Inalámbrica) que permite a los elementos de la red establecer comunicaciones entre de ellos en modo Ad-hoc, este nodo se convierte ahora en un *Nodo Sensor* de la WAWSN que llamaremos en lo sucesivo Red Inalámbrica de Sensores de Deformación del Valle de Mexicali (RISDEFVM) (Figura 5).



Figura 4: *Nodo "Corral Vacas" de la Red de Deformación del Valle de Mexicali.*

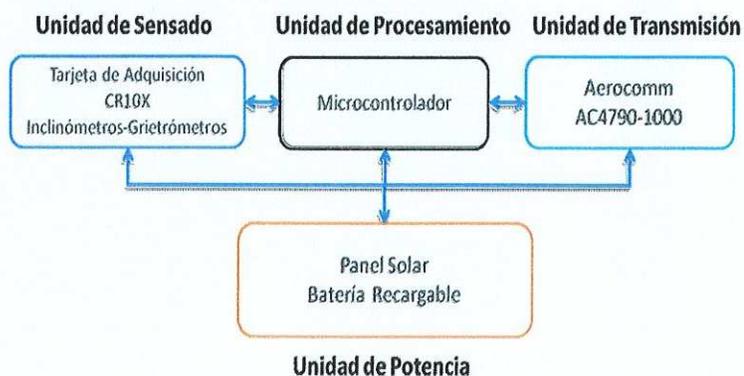


Figura 5: *Nodo Sensor de la Red Inalámbrica de Sensores de Área Amplia.*

El diseño de esta interfaz inalámbrica en la tesis de Cortez [2006] fue dividido en 3 secciones: fuente de alimentación, circuito lógico (microcontrolador e interfaz de comunicación serial) y tarjeta de comunicación inalámbrica. Por lo que para explicar las mejoras realizadas a dicho diseño, en esta tesis se exponen de la misma manera.

III.1.1 Fuente de Alimentación.

Es uno de los elementos más importantes de un sistema, ya que es la encargada de suministrar el voltaje y la corriente necesaria a todos los circuitos electrónicos que lo forman.

La fuente de energía del *Nodo Sensor* es una batería de 12V que proporciona 7AH de corriente continua y que es recargada por un panel solar BP SX20 de 20 W de potencia máxima. La fuente de alimentación que se presentó en [Cortez Vázquez, 2006] tiene que realizar una conversión de voltaje de 12 a 3.3 Volts, para alimentar dispositivos de bajo consumo de energía (Low Voltage). Esta conversión la realiza en dos etapas utilizando reguladores de voltaje lineales. En la primera etapa el voltaje se adapta de 12 V a 5 V @ 1.5A, utilizando el convertidor lineal de voltaje de Texas Instruments UA7805, y en la segunda etapa se convierte de 5 V a 3.3 V @ 1.5A con el convertidor lineal de voltaje LDO (Low Dropout) de Texas Instruments TPS78633. Ambos manejan empaquetados KTE, los cuales son de montaje superficial y que utilizan como disipador el circuito impreso de la interfaz inalámbrica. El diagrama de la fuente de alimentación es presentado en la figura 6.

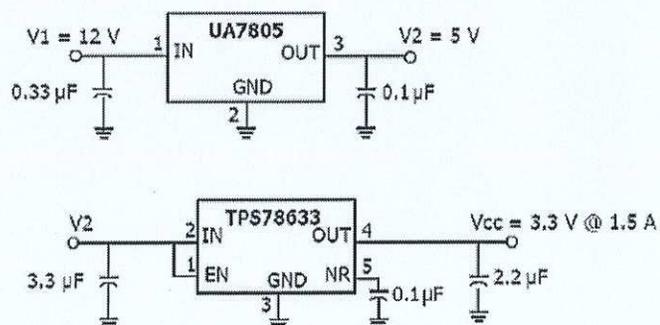


Figura 6: Fuente de Alimentación Lineal.

Como los componentes que integran a la fuente de alimentación son lineales, esta fuente de alimentación es clasificada como de tipo lineal. El funcionamiento de este tipo de fuentes de manera muy simplificada se puede basar en un transistor de paso que trabaja en su zona lineal. En esta zona el transistor funciona como un grifo de corriente que deja pasar menor

o mayor intensidad en función de las necesidades de la carga. Así cuando la carga requiere de más energía deja pasar mayor corriente, y cuando requiere de menos reduce el paso de la corriente.

De los inconvenientes de este tipo de fuentes es que al trabajar en la zona lineal tienen menor margen de operación, además de que en la regulación del voltaje disipan gran parte de la energía en forma de calor, situación que no es favorable en sistemas donde la energía es un recurso escaso y que es indispensable cuidar.

Otra de las desventajas que tienen este tipo de fuentes son el bajo desempeño que manejan, ya que entregan entre el 30 y 60 % de la energía que reciben, así también estas fuentes son solo reductoras y cada regulador maneja un solo voltaje de salida requiriendo utilizar un voluminoso disipador de calor.

Por otro lado existen las fuentes de alimentación conmutadas, cuyo elemento característico es un regulador que se encuentra conmutando encargándose de mantener el voltaje de manera constante frente a las variaciones de la intensidad de corriente demandada por la carga. Simplificando en gran medida el funcionamiento de este tipo de fuentes, se puede mencionar que este tipo de reguladores trabajan modulando el ancho de pulso de una señal que excita a un transistor (transistor de paso), llevándolo a un estado de corte o conducción. Este transistor actúa como un "interruptor", conectando y desconectando a gran velocidad la carga, de la fuente de alimentación; y la velocidad de conmutación esta en función de las necesidades de la carga. Así, cuando la carga necesita más energía aumenta el ancho del pulso y el transistor permanece conduciendo más tiempo, y cuando no requiere de tanta energía, el transistor permanece sin conducir por un prolongado periodo de tiempo. El regulador al realizar una comparación del voltaje en la carga con uno de referencia, conoce si la carga necesita una mayor o menor energía de la que se encuentra suministrando en ese instante. Es así que si el voltaje que se encuentra alimentando a la carga cae por debajo de un umbral, significa que la carga necesita mayor corriente de la suministrada por la fuente

de alimentación en ese instante, y en caso contrario si el voltaje que se encuentra en la carga es mayor que el de referencia, la carga no requiere de mas corriente.

Las principales ventajas de este tipo de fuentes son su gran eficiencia, ya que se encuentra entre un 80 y 90 % [Ruiz Robredo G.A., 2001], poca disipación de calor, reducido volumen y puede proveer mas de un voltaje de salida.

Tomando en cuenta las ventajas y desventajas de los dos tipos de fuentes de alimentación y siguiendo las recomendaciones del fabricante de la tarjeta de comunicación inalámbrica (radio AC4790-1000) dadas en [Aerocomm, 2007], se opto por utilizar una fuente de alimentación conmutada en los nuevos modelos de interfaz inalámbrica. El esquemático que se propone se muestra en la figura 7.

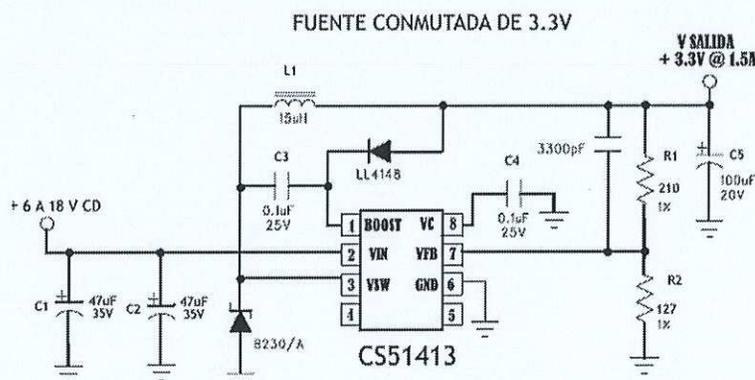


Figura 7: Fuente de Alimentación conmutada.

El circuito integrado utilizado en esta fuente conmutada es el CS51413 del fabricante ON Semiconductors que pertenece a la familia de reguladores tipo BUCK, los cuales son utilizados para construir fuentes conmutadas reductoras con alta frecuencia de oscilación. Estos integrados manejan voltajes de entrada de entre 4.5 y 40 Volts, proporcionando una corriente de la salida de 1.5A. Los beneficios obtenidos al utilizar este tipo de integrado son un voltaje de salida preciso, una notable reducción de la disipación de potencia en condiciones de corto circuito, maximización de la eficiencia, reducción del ruido electromagnético y una muy baja disipación de potencia en modo de espera.

III.1.2 Control Lógico y Puertos de Comunicación.

El control lógico de la interfaz inalámbrica es realizado por un microcontrolador con un programa grabado en su memoria. En dicho programa, se ejecutan los algoritmos de enrutamiento y la identificación de los paquetes que circulan por la red y en base a estos se determina en que momento el microcontrolador se comunica con la tarjeta de adquisición de datos para “ordeñar” la información almacenada en su memoria y así transmitirla hacia el *Nodo de Acceso* utilizando la tarjeta de comunicación inalámbrica.

III.1.2.1 Primer modelo.

El microcontrolador usado en el primer modelo de interfaz inalámbrica fue el PIC18LF452 de la compañía Microchip. La elección de este microcontrolador según comenta [Cortez Vázquez, 2006] en su tesis, fue hecha por desconocimiento de las dimensiones del programa que iba a albergar, así como la falta de herramientas para programar microcontroladores con más recursos, que por lo regular tienen un número mayor a 40 pines. Éste microcontrolador tiene la capacidad de almacenar 16,384 instrucciones de 16 bits en su memoria de programa de 32 KBytes. Tiene una memoria de datos de 1.5kBytes, la cual fue suficiente para albergar las variables de los algoritmos de enrutamiento programados por Cortez Vázquez [2006]. Además, posee un solo puerto de comunicación serie compatible con el protocolo RS-232, utilizado para comunicarse tanto con la tarjeta de comunicación inalámbrica, como con la tarjeta de adquisición de datos.

La comunicación entre el microcontrolador y las dos tarjetas pudo llevarse a cabo utilizando un conmutador digital, el cual comparte el único puerto serie (Figura 8). El circuito integrado encargado de realizar esta tarea, fue el SN74CBTLV3257 de Texas Instruments conocido como MUX/DEMUX de 1 a 2 líneas de 4 bits. Éste circuito proporciona muy altas velocidades de conmutación y asegura una alta impedancia entre los dispositivos que interconecta. Además, fue utilizado el circuito integrado MAX3222 de la compañía MAXIM, para adaptar el voltaje del MUX/DEMUX (3.3V-LVTTL) hacia los voltajes utilizados en el protocolo de comunicación RS-232 (+V,-V).

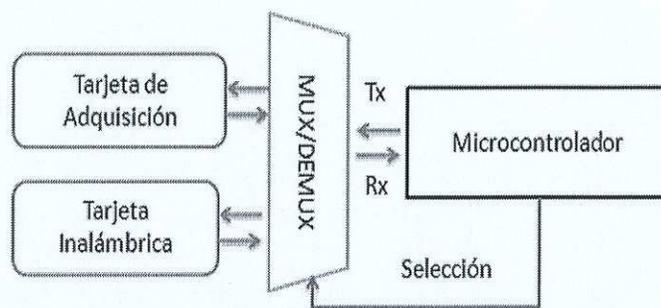


Figura8: Control lógico del primer modelo de interfaz inalámbrica.

Cabe señalar que la interfaz inalámbrica al contar con un solo puerto de comunicación serie, ésta no podría interactuar simultáneamente con una computadora personal y/o tarjeta de adquisición de datos, lo cual la limita a ser utilizada en aplicaciones muy particulares. De igual forma se encuentra limitada a utilizar las velocidades de transferencia de datos que proporciona el protocolo de comunicación RS-232, las cuales cada día van “volviéndose más lentas” debido a los avances en la tecnología.

III.1.2.2 Segundo Modelo.

El control lógico del segundo modelo de interfaz inalámbrica ha sido diseñado pensando en superar las limitaciones del primer modelo, dándole la facultad de establecer comunicación con equipos tales como computadoras personales, tarjetas de adquisición de datos, controladores, etc., de forma simultánea y a velocidades de transferencia de datos mayores que las utilizadas con el protocolo de comunicación RS-232.

Para conseguir lo antes mencionado, se agregó a la interfaz inalámbrica un puerto USB (Universal Serial Bus), el cual maneja dos vías de comunicación en donde se pueden hacer transferencias de datos a 1.5Mbit/s (baja velocidad) y 12 Mbit/s (velocidad completa).

Ahora bien para poder agregar este puerto de comunicación, fue imprescindible cambiar de modelo de microcontrolador y emigrar hacia un dispositivo que proporcionara el hardware

necesario en un solo circuito integrado. La elección de este dispositivo fue tomada considerando que todos los algoritmos y el código escrito del protocolo de enrutamiento por trayectorias múltiples M a 1 de la tesis de Cortez Vázquez [2006], fueron realizados con herramientas de desarrollo de Microchip, por lo que para evitar el cambiar estos códigos hacia otros esquemas, se eligió trabajar con el microcontrolador PIC18F2550 de Microchip. Este es uno de los microcontroladores con desempeño mejorado que utiliza tecnología de nanoWatt, el cual consume poca energía cuando se encuentra en modo dormido, es de menor tamaño (24 pines de entrada o salida), cuenta con 32 kBytes de memoria de programa que es capaz de albergar 16384 instrucciones de 16 bits y posee una memoria de datos de 2Kbytes. Maneja un modulo de comunicación serie que puede utilizarse como síncrono o asíncrono, así como un módulo de comunicación USB con dos velocidades de transmisión (baja y completa).

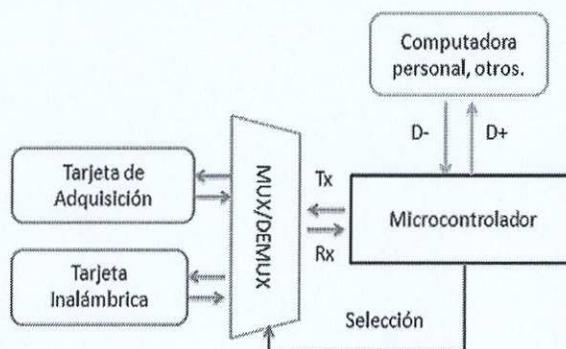


Figura9: Control lógico del segundo modelo de interfaz inalámbrica.

Para que el microcontrolador pudiera establecer comunicación por el puerto USB hacia otros dispositivos, fue necesario utilizar uno de los cuatro firmwares² proporcionados por el fabricante, adaptándolo de tal manera que se ajustara a los requerimientos del programa del usuario. El firmware elegido en esta tesis fue la clase CDC (Communication Device Class), debido a la sencillez y flexibilidad que se presenta al utilizarla, ya que encapsulan varias funciones para ocultar toda la complejidad al usuario y así llevar a cabo una exitosa

² Es un bloque de instrucciones de programa para propósitos específicos, grabado en una memoria de tipo no volátil, que establece la lógica de más bajo nivel que controla los circuitos electrónicos de un dispositivo.

comunicación por el puerto USB. En ésta se sigue el mismo esquema de enviar y recibir cadenas de caracteres como se realiza en una comunicación RS-232 tradicional, por lo que programas desarrollados como interfaces gráficas de usuario que siguen este esquema puedan adaptarse al nuevo puerto con un mínimo de cambios en el código escrito.

En este segundo modelo de interfaz inalámbrica, al disponer de un solo puerto de comunicación RS-232, tiene que compartirse tal y como sucede en el primer modelo. Esto limita a que solo se pueda tener acceso a la tarjeta de adquisición de datos bajo un esquema de petición, sin poder considerar un esquema dado por eventos. Es evidente que aplicaciones que demanden este último tipo de esquema, un solo puerto de comunicación RS232 no es suficiente a pesar de contar con el puerto USB.

III.1.2.3 Tercer Modelo.

Al considerar un escenario en donde la tarjeta de adquisición de datos de un *Nodo Sensor* requiere transmitir constantemente información hacia el *Nodo de Acceso*, el control lógico de la interfaz inalámbrica debe ser lo suficientemente flexible, permitiendo atender a esta tarjeta de adquisición sin dejar a un lado el procesamiento inmediato a paquetes recibidos por otros nodos. Para conseguir dicha flexibilidad, es necesario que el microcontrolador posea dos puertos de comunicación serie RS-232, uno dedicado a la tarjeta de adquisición de datos y/o sensores y el otro al radio.

Después de realizar una investigación en los diferentes modelos de la gama mejorada de los microcontroladores de Microchip, se encontró que el PIC18F67J50 cuenta con los recursos para tener un control lógico flexible, como el que se presenta en la figura 10. Este microcontrolador ha sido diseñado para trabajar con bajo consumo de potencia en modo dormido (ideal para aplicaciones alimentadas por baterías), posee 49 pines de Entrada/Salida, 128 kbytes de memoria de programa, 4kbytes de memoria de datos y una extensa gama de periféricos que se muestran en la tabla II.

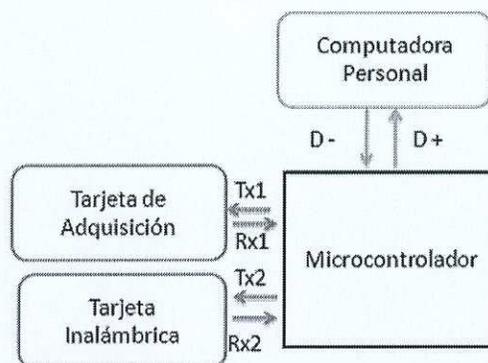


Figura10: Control lógico del tercer modelo de interfaz inalámbrica.

Es notorio que los recursos de este microcontrolador sobrepasan a lo requerido para resolver esta necesidad, sin embargo, el contar con un control lógico de estas características ofrece la posibilidad de integrar esta interfaz inalámbrica a diversas aplicaciones. Las características generales de los tres microcontroladores utilizados en los modelos de interfaz inalámbrica se muestran en la tabla II.

Tabla II. Características de los microcontroladores empleados en los modelos de interfaz inalámbrica. .

Características	PIC18F452	PIC18F2550	PIC18F67J50
Frecuencia de Operación	DC-40Mhz	DC-40Mhz	DC-48 MHz
Memoria de Programa	32k	32K	128k
Instrucciones	16384	16384	65536
Memoria de Datos	1536	2048	3904
Memoria de datos EEPROM	256	256	FLASH
Fuentes de Interrupción	18	19	30
Puertas de I/O	A, B, C, D, E	A, B, C	A, B, C, D, E, F, G
Temporizadores	4	4	5
Módulos de Captura/Comparación/PWM	2	5	5
Comunicaciones Serie	MSSP,USART Mejorada	MSSP, USART Mejorada, USB	MSSP (2), USART Mejorada (2), USB
Modulo de Convertidor Analógico Digital de 10 bits	8 canales	10 canales	8 canales
Empaquetado	40-pin DIP	28-pin SOIC	64-pinT-QFN

III.1.3 Tarjeta de Comunicación Inalámbrica.

Los nodos sensores que operan de acuerdo al estándar 802.15.4 [IEEE 802.15.4 Task Group] no son apropiados para establecer comunicaciones a grandes distancias [Cortez Vázquez, 2006], ya que debido a su reducido tamaño, no cuentan con una tarjeta de comunicación inalámbrica (radio) que transmita con gran potencia, así como de una fuente de energía que le proporcione la corriente necesaria para dicho fin [Baronti *et al*,2006]. Es por tal motivo que las tarjetas de comunicación inalámbrica empleadas para establecer enlaces inalámbricos a distancias de kilómetros, llegan a transmitir hasta 1W de potencia. Estas tarjetas utilizan una tecnología de radiofrecuencia conocida como Espectro Esparcido en Saltos de Frecuencia (FHSS-Frecuency Hopping Spread Spectrum) operando en la banda Industrial Científica y Médica de 902-928 Mhz, ya que en dicho intervalo de frecuencias la señal que es transmitida sufre menos pérdidas por propagación que las utilizadas en la banda de los 2.4 Ghz [Rappaport, 1999].

El FHSS es una técnica de transmisión de datos en la cual la información de interés se distribuye sobre un ancho de banda mucho mayor que los usados en sistemas de banda angosta, ofreciendo con esto:

- Altos esquemas de seguridad frente a interferencias intencionales por parte de alguien que desea bloquear o interceptar una comunicación (anti-jamming).
- Protección frente al fenómeno de multitrayectoria ocasionadas por diversos obstáculos que se presentan en el entorno.
- Posibilidad de que diferentes tarjetas de comunicación inalámbrica puedan intercambiar información entre ellas en una misma zona sin que se interfieran. Esto debido a que los saltos en frecuencia están determinados por una secuencia pseudoaleatoria que solo conoce el par de radios involucrados en la comunicación.

Existen diversos fabricantes de tarjetas de comunicación inalámbrica de gran alcance que utilizan esta tecnología (Maxstrem, Aerocomm, Microhard Systems, RFM, etc.) y que proporcionan tarjetas de desarrollo flexibles, las cuales pueden comunicarse con diversos

Equipos de Fabricantes Originales-OEM (microcontroladores, computadoras personales, etc) por diferentes puertos de comunicación. Pero se tiene la desventaja que este tipo de tarjetas solo trabajan en topologías de tipo punto a punto, punto a multipunto y estrella, dejando la labor de enrutamiento al OEM.

La tarjeta de comunicación inalámbrica utilizada en todos los modelos de la interfaz es la AC4790-1000 del fabricante Aerocomm. Se trabajó con este tipo de tarjetas debido a que ya se contaban con ellas al iniciar la tesis.

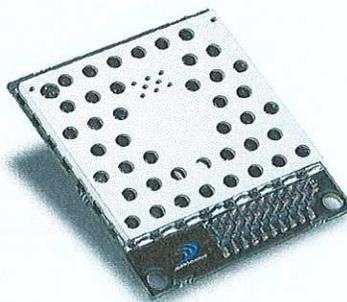


Figura11: Tarjeta d comunicación inalámbrica de gran alcance AC4790-1000.

Dentro de las principales características de funcionamiento de estas tarjetas, se tienen las siguientes:

- Al utilizar una técnica de transmisión de datos FHSS, cada salto lo realiza en 50 ms. Durante este lapso de tiempo el radio puede transmitir hasta 128bytes de información de usuario después de que se haya entrando a una sesión continua con el radio receptor.
- Todas las tarjetas poseen un identificador (dirección MAC) que facilita el enrutamiento de paquetes por parte de la unidad de procesado.
- Cuenta con tres modos de funcionamiento: recepción, transmisión y comandos. El modo de recepción es el estado por defecto que guarda la tarjeta de comunicación inalámbrica, aquí se encuentra en espera de una señal de sincronía que le permita entrar en una sesión con el radio transmisor y así empezar a recibir datos. El modo de transmisión es en donde después de ponerse de acuerdo con el receptor se transmiten las cadenas de datos, hacia una tarjeta en particular o a todas las que tenga dentro de su

área de cobertura. Aquí, para incrementar la probabilidad de éxito en la entrega, se pueden realizar hasta 255 retransmisiones antes de notificar al microcontrolador la pérdida del paquete. El modo de comandos es en donde el microcontrolador puede acceder a los parámetros de operación del radio, tales como: la potencia de transmisión, el número máximo de retransmisiones, la velocidad de transmisión del puerto serie, entre otros.

- Contiene tres APIs de control (Application Programming Interface - Interfaz de Programación de Aplicaciones) que facilitan al microcontrolador transmitir y recibir paquetes con las tarjetas de comunicación inalámbricas, ya que ofrecen una estructura ordenada de campos en donde se maneja información acerca de la transmisión de los paquetes (exitosa-errónea), la intensidad de potencia con la que fueron recibidos, identificación del nodo que envía el mensaje y tamaño de la carga útil.
- Por otro lado el radio AC4790-1000, posee un protocolo de comunicación entre radios “peer to peer”, realizando la transmisión de paquetes en modo Half Duplex y Full Duplex. Ambos tipos de transmisión influyen en el cálculo del tiempo de recolección de paquetes de los nodos en la RISDEFVM como se observa en el apéndice A1, así también con el caudal eficaz (throughput). La figura 12 muestra la forma en como el radio comparte inteligentemente el ancho de banda para habilitar dos canales de comunicación libre de colisiones en modo Full Dúplex. El radio que inicia la sesión transmite en saltos pares, dejando la posibilidad de recibir paquetes por parte de otro radio en saltos impares.

Las características eléctricas y físicas del radio AC4790-1000 se muestran en la tabla III. Como se puede observar en ésta, la potencia de transmisión puede ser variada de 5 mW a 1000 mW, lo cual es atractivo en situaciones en donde se requiere cambiar de potencia para ahorrar energía o para tratar de mantener correctos enlaces inalámbricos entre un par de radios. Además el alcance que tienen estos radios es más que suficiente para cubrir las distancias entre nodos que se tienen en la RDEFVM, aunque factores como la altura y ganancia de las antenas, cables, distancia y tipo de entorno en donde es instalado el sistema

(rural, urbano, semi-urbano), disminuyen notablemente el alcance de los radios [Rappaport, 1999].

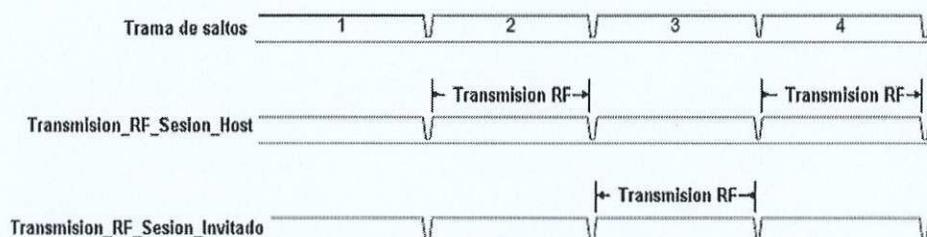


Figura12: Modo de transmisión Full Duplex.

Tabla III. Características Generales del Radio de gran alcance AC4790-1000.

GENERAL									
Conector de 20 pines	Molex 87759-0030								
Conector para Antena	MMCX Hembra								
Tasa de transmisión de datos serial	1200 bps a 115,200 bps								
Consumo de potencia (típico)	Ciclo de Trabajo (TX=Transmisión; RX=Recepción) <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>10%TX</td> <td>50%TX</td> <td>100%TX</td> <td>100%RX</td> </tr> <tr> <td>130mA</td> <td>650mA</td> <td>1300mA</td> <td>30mA</td> </tr> </table>	10%TX	50%TX	100%TX	100%RX	130mA	650mA	1300mA	30mA
10%TX	50%TX	100%TX	100%RX						
130mA	650mA	1300mA	30mA						
Potencia de Transmisión	5mW a 1W								
Canales	3 conjuntos de canales que comprenden un total de 56 canales								
Seguridad	Un ID de un byte.								
TRANSCEPTOR									
Bandas de frecuencia	902-928 MHz								
Tasa de Transmisión en RF	76.8kbps fija								
Tecnología de RF	Frecuency Hopping Spread Spectrum								
Potencia de Salida	(sin antena) EIRP(3dBi ganancia de la Antena) 743mW 1486mW								
Voltaje de Alimentación	Pin 10: 3.3V-5.5V ±50mV% Pin 11: 3.3V ±3% Pines 10 y 11 deben ser unidos, proporcionándoles una fuente de alimentación que nunca caiga de 3.3V y sea capaz de entregar 1.5ª de corriente.								
Sensibilidad	-100 dBm típico @ 76.8kbps en Tasa de Tx en RF								
Alcance, Línea de vista (basado con una antena de 3 dBi)	20 millas								
ENTORNO									
Temperatura (Funcionando)	-40°C a 80°C								
Humedad	10% a 90%								
FISICAS									
Dimensiones	Transceptor 1.65" x 1.9"x .020"								

III.2 Implementación de la Interfaz Inalámbrica.

El diseño del circuito impreso (PCB- Printed Circuit Board) del primer modelo de interfaz inalámbrica fue realizado con la herramienta EAGLE versión 4.16r2, cuya dimensión final fue de 15x10 cm, utilizando una cara para el ruteado. Lo que se pudo observar de este diseño fue la inapropiada distribución de los componentes electrónicos sobre la tarjeta, debido a que no existe un balanceo de las cargas conectadas a la fuente de alimentación, es decir, el dispositivo que consume mayor corriente (Radio AC4790-1000) esta conectado después de todos los demás componentes electrónicos de la interfaz (microcontrolador, MUX/DEMUX), lo que provoca que existan fluctuaciones en la corriente suministrada por la fuente de alimentación hacia los dispositivos cuando el radio se encuentra transmitiendo paquetes. Además las líneas empleadas en el ruteado son delegadas, prolongadas y tienen ángulos de 90 grados, lo cual propiciaría que se comportasen como pequeños generadores de ruido. Otra de las situaciones presentes en este modelo, es la estructura física del microcontrolador utilizado, el cual al ser de encapsulado tipo DIP (Dual In-line Package) puede ser retirado de la interfaz para así reprogramarlo con las actualizaciones de los protocolos de enrutamiento. Sin embargo, el estar insertando y retirando el microcontrolador, situación que se presenta cuando se requieren hacer las pruebas del funcionamiento del protocolo, después de varias ocasiones provoca que el microcontrolador y el zócalo en donde es conectado no tengan un acoplamiento correcto generando un funcionamiento indeseable en la interfaz inalámbrica. En el apéndice A.2 se observa el diagrama de componentes y el negativo del PCB utilizado por Cortez Vázquez [2006] para construir el primer modelo de interfaz inalámbrica.

Para realizar el diseño del segundo modelo de interfaz inalámbrica fue necesario seguir algunas reglas de diseño de circuitos impresos [Jones D.L, 2004], esto con la finalidad de superar las limitaciones del primer modelo. El diseño consistió en primera instancia de un PCB de dos caras, cuya dimensión final fue de 12x8 cm, en donde ahora se tiene una correcta distribución de los dispositivos sobre el impreso, dividiendo la entrega de energía hacia los componentes en tres secciones (radio, microntrolador y MAX3222-

MUX/DEMUX). El grosor de los trazos de la fuente de alimentación son los adecuados para manejar la corriente que se demanda, así también los utilizados para las conexiones entre los componentes, procurando tener trazos más cortos y con ángulos de 45°. Se han agregado planos de tierra en ambas caras para disminuir el ruido en el sistema. Los componentes empleados son todos de montaje superficial lo cual disminuye el ruido generado por los zócalos de la primera versión y además se asegura que permanezcan fijos en la placa.

Al encontrarse empotrado el microcontrolador sobre la placa, se ha agregado un puerto de programación ICSP (In Circuit Serial Programming), el cual consta de tres líneas de control (VPP, PGC y PGD) y una línea de alimentación. Éste puerto es utilizado para cargar los diferentes programas que dictan el funcionamiento de la interfaz inalámbrica, dando la posibilidad de no estar retirando el microcontrolador para programarlo.



Figura13. : Implementación del segundo modelo de Interfaz Inalámbrica.

En este modelo, el microcontrolador puede manejar el control de flujo en la comunicación serie con la tarjeta de comunicación inalámbrica, así también poder reiniciarla, leer o escribir en su memoria EEPROM parámetros como potencia, tiempo de retracción entre retransmisiones, activación de las API's de control, etc. El diagrama de componentes y el negativo del PCB del segundo modelo de interfaz inalámbrica se muestran en el Apéndice

A.3 y el circuito final se muestra en la figura 13. Como se puede observar en estos, el número de componentes utilizados se incrementó en comparación al primer modelo, más sin embargo el consumo de energía sigue siendo mucho menor que el del primer modelo, situación que se explica a detalle en el apéndice A.1.



Figura14. : Implementación del tercer modelo de Interfaz Inalámbrica.

El diseño del tercer modelo de interfaz inalámbrica involucra las mismas mejoras realizadas en el segundo modelo, pero a diferencia de este último, se tiene un microcontrolador de más recursos, por lo que se realizó un diseño que los aprovechara al máximo. Dentro de las características más importantes de esta interfaz inalámbrica, se tienen múltiples puertos de comunicación, con los cuales puede ser fácilmente adaptada a diversas aplicaciones de Redes Inalámbricas de Sensores. Los puertos de comunicación con los que dispone dicha interfaz son un puerto USB, dos puertos de comunicación serie, un puerto de programación y un puerto de 8 bits en paralelo, el cual puede establecer comunicación con dispositivos como LCDs y/o teclados hexadecimales. Además posee tres pines que pueden utilizarse como un medio para interrumpir al microcontrolador de sus funciones habituales. Estas interrupciones pueden ser generadas por eventos que no se encuentran relacionados con la estructura interna de la interfaz. Ejemplos de éstos pueden presentarse cuando el circuito encargado de medir el voltaje de la batería le avisa al microcontrolador, mediante una señal

aplicada a alguno de estos pines, que el voltaje ha caído por debajo de un umbral, o también cuando el microcontrolador recibe una señal enviada por un sensor de proximidad indicando la presencia de personas en un área restringida. También dispone de un convertidor Analógico-Digital de 10 bits proporcionado por la tarjeta de comunicación inalámbrica y de LEDs indicadores (RX-TX paquete, USB conectado, Programación, Estado de la Sesión). El negativo y el diagrama de componentes del tercer modelo son mostrados en el Apéndice A.3 y el circuito final en l figura 14.

Protocolos de Enrutamiento para Redes Inalámbricas Ad-Hoc

Un protocolo de enrutamiento es una serie de acciones que dictan la forma en como elementos de una red llamados nodos pueden comunicarse con otros para difundir información acerca de la topología de la red.

En los últimos años se han desarrollado varios protocolos de enrutamiento para redes inalámbricas Ad-Hoc [Sánchez Laguna, 2006; Murthy C. S. R. y Manoj B. S., 2004]. La movilidad de los nodos, la inestabilidad de la topología, la falta de organización preestablecida y factores que se presentan en las comunicaciones inalámbricas (ancho de banda limitado, pérdidas por propagación, energía, etc.), hacen que en estas redes no se puedan utilizar los algoritmos de enrutamiento desarrollados para redes fijas. En una red inalámbrica Ad-Hoc, los algoritmos de enrutamiento tienen que crear las estructuras de enrutamiento de una forma distribuida y automática, proporcionando con esto la capacidad de que los nodos que forman la red se auto organicen y puedan responder a cambios topológicos en la red.

En este capítulo se describe de forma breve una de las muy variadas clasificaciones que existen de los protocolos de enrutamiento para las Redes Inalámbricas de Sensores, que como ya se ha tratado son un caso particular de las Redes Inalámbricas Ad-Hoc. Así como la descripción de dos protocolos de enrutamiento que ofrecen una solución al problema que se tiene cuando un nodo de la WAWSN sale de la red sin previo aviso.

IV.1 Clasificación de los Protocolos de Enrutamiento para Redes Inalámbricas de Sensores.

En las WSN, aspectos tales como el número de Nodos de Acceso, el despliegue y capacidades de los Nodos Sensores, patrón de comunicación, métodos de entrega de datos, manejo de recursos, etc, [Ács G. y Buttyán L., 2007] determinan el tipo de protocolo de enrutamiento que se debe seguir en la red.

Por lo general estos protocolos son clasificados en tres categorías (Figura 15). La primera toma en cuenta la estructura de la red y los clasifica como planos, jerárquicos y de localización. La segunda clasificación esta en función de como es la operación del protocolo, basados por trayectorias múltiples, por consulta, por negociación, calidad de servicio (QoS). Y por ultimo pueden ser clasificados por la forma en que un nodo fuente encuentra el camino hacia un nodo destino (proactivos, reactivos e híbridos).

IV.1.1 Basados en la Estructura de la Red.

Planos.

La característica principal en este tipo de protocolos es que cada nodo que forma la red, tiene asignadas las mismas tareas y manejan los mismos recursos de cómputo, memoria, energía, unidad de transmisión, etc. A su vez colaboran entre de ellos para realizar el sensado de un área en particular. Los protocolos que se ajustan a esta categoría son el SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation), Difusión Dirigida, Enrutamiento por rumores, Minimum Cost Forwarding Algorithm (MCFA).

Jerárquicos.

En el caso de los protocolos jerárquicos, existen nodos en la red que tienen un más alto nivel de jerarquía que la mayoría de los nodos que la forman. Estos nodos son dotados de

mayores recursos de energía y capacidades de cómputo, debido a que por ellos viaja una gran cantidad de tráfico. Son los encargados de concentrar los datos de otros nodos sensores de un área determinada, transmitiéndolos hacia otros nodos con características similares, mediante diversas técnicas como la agregación de datos, disminuyendo con esto los paquetes que circulan por la red; en consecuencia, se logra un menor consumo de los recursos de la red incrementando su tiempo de vida. Al conjunto de nodos que envían datos hacia estos nodos de mayor jerarquía se les llaman miembros del grupo (clusters), mientras que al que los gobierna se le conoce como cabeza de grupo.

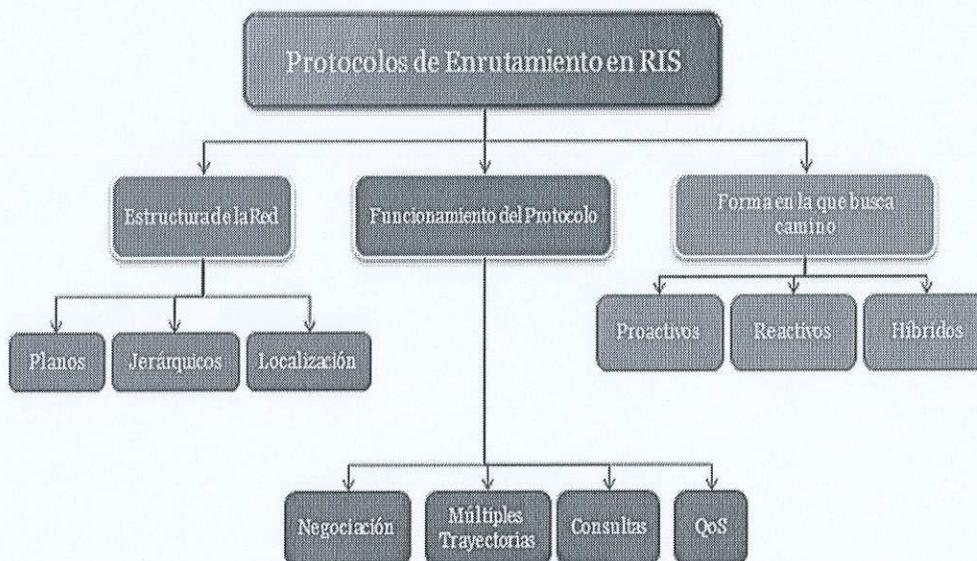


Figura15. : Clasificación de los Protocolos de Enrutamiento para Redes Inalámbricas de Sensores.

Aquí se manejan dos etapas, en las cuales una de ellas es usada para seleccionar a los cabezas de grupo y la otra para enrutar los datos. Como ejemplos de estos protocolos se tienen LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) protocolo que ha servido como base para crear a otros como TEEN (Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol), Adaptive TEEN, PEGASIS, etc.

Basados en la Localización.

Los protocolos que basan el enrutamiento de los datos de acuerdo con la ubicación de los nodos en la red, estiman la distancia entre nodos por coordenadas que son obtenidas en el intercambio de mensajes entre los nodos vecinos y/o a través de la intensidad de potencia recibida entre de ellos. De manera alternativa, la localización de los nodos puede estar disponible de manera directa utilizando un GPS (Global Positioning System), si el nodo esta equipado con un receptor de bajo consumo con estas características. En estos esquemas de enrutamiento para ahorrar energía, los nodos que no se encuentran involucrados en la transferencia de información dentro de una región determinada pasan a un estado de inactividad [Chen *et al*, 2002]. Ejemplos de este tipo de protocolos se tienen en GAF (Geographic Adaptive Fidelity), GEAR (Geographic and Energy Aware Routing) y SPAN.

IV.1.2 Basados en como buscan ruta hacia un nodo en la red.

Proactivos.

Los algoritmos de enrutamiento proactivos son aquellos en donde los nodos de la red intercambian periódicamente mensajes de control, para tener continuamente actualizadas las rutas hacia posibles nodos destinos en la red. Una de las ventajas de tener un protocolo de estas características es la rápida respuesta de los nodos a los cambios en la topología de la red; sin embargo tienen la desventaja de que al utilizar más paquetes de control provoca que se sobrecargue la red. Dentro de estos protocolos se tiene el DBF (Distributed Bellman-Ford), DSDV (Destination-Sequenced Distance Vector), WRP (Wireless Routing Protocol), OLSR (Optimized Link State Routing Protocol) y GSR (Global State Routing).

Reactivos.

Los protocolos que funcionan bajo demanda, es decir, que obtienen rutas hacia un nodo destino en particular cuando un nodo fuente lo solicita, son los llamados reactivos. Estos algoritmos intentan minimizar todo intercambio de información innecesario, reducen la sobrecarga de la red originada por los mensajes de control debido a que no se transmiten de

forma periódica, teniendo solo activas las rutas que se estén utilizando hacia un destino. En este protocolo cuando un nodo necesita comunicarse, inicia un proceso que se conoce como descubrimiento de ruta, el cual consiste en difundir un mensaje de control solicitando la ruta hacia un destino, en espera de una respuesta que incluya dicha ruta. El principal inconveniente de este tipo de protocolos es el retardo en el descubrimiento de rutas para iniciar la comunicación. Ejemplos de este tipo de protocolos se tienen DSR (Dynamic Source Routing), AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector), TORA (Temporally Order Routing Algorithm), etc.

Híbridos.

Los protocolos Híbridos tienen características tanto de los protocolos reactivos y proactivos. Estos protocolos están diseñados para aumentar la escalabilidad permitiendo que los nodos de la red tengan una estrecha proximidad con otros, lo cual permite que trabajen juntos como una estructura de columna vertebral, reduciendo así la sobrecarga de la red en el descubrimiento de rutas. La mayoría de los protocolos híbridos propuestos son basados en zona, lo que significa que la red es repartida en un número de zonas que son atendidas por cada nodo. Ejemplos de protocolos de enrutamiento híbridos son ZRP (Zone Routing Protocol), DST (Distributed Spanning Trees) y DDR (Distributed Dynamic Routing).

Dado que los nodos sensores en una WSN poseen recursos limitados (memoria, procesamiento, energía) y el número de estos en una red es muy grande, los nodos no pueden almacenar un gran número de tablas de enrutamiento, por lo tanto, los protocolos de enrutamiento reactivos e híbridos son atractivos en este tipo de redes. Pero para aplicaciones en donde no se tiene un gran número de nodos y además no se encuentran tan limitados en energía, como se presenta en la RISDEFVM, podría ser utilizado sin mayor problema algún protocolo proactivo, aportando a la red las ventajas de utilizar este tipo de protocolos.

IV.1.3. Basados en el funcionamiento del protocolo.

Basados en Consultas.

En este tipo de enrutamiento, el nodo interesado en obtener cierta información acerca de una región monitoreada, propaga un mensaje de consulta a través de los nodos en la red. Por lo que cuando este mensaje de consulta llega a un nodo que tiene información relacionada con lo que se pide, la envía hacia el nodo que inicia la consulta tomando en cuenta la métrica proporcionada en el mensaje (menor número de saltos, menor retardo, mejor calidad del enlace, etc.). Por ejemplo, un cliente C1 envía una consulta hacia el nodo N1 y le pregunta: ¿Hay vehículos en la región 1 del campo de batalla?. Al llegar el mensaje a N1, este le responde siguiendo la trayectoria en reversa construida con base al menor número de saltos. Protocolos que se amoldan a esta clasificación son el protocolo de enrutamiento por Difusión Dirigida y por Rumores.

Basados en Negociación.

Este tipo de protocolos tienen como objetivo principal el de suprimir información duplicada, evitando transmitir paquetes redundantes a nodos vecinos o a la estación base mediante una serie de mensajes de negociación (meta-datos) antes de que empiece la transmisión de los paquetes. Las decisiones en la comunicación son tomadas en base a la información entregada por estos mensajes de negociación y a los niveles de energía de la batería de los nodos. La familia de los protocolos SPIN [Heinzelman *et al*, 1999] son ejemplos de este tipo de algoritmos. El utilizar este tipo de esquemas reduce el uso de la inundación para diseminar paquetes, que produce el problema de implosión³ y de traslape entre la información recolectada por los nodos sensores. Además de que el inundar la red consume más energía y más procesamiento por enviar el mismo dato por diferentes nodos sensores.

³ Se presenta cuando el nodo procesa copias de un mismo paquete.

Basados en parámetros de Calidad de Servicio (QoS).

En los protocolos de enrutamiento basados en Calidad de Servicio, la red tiene un balance entre consumo de energía y calidad en la entrega de los datos. En particular, la red tiene que satisfacer métricas de QoS, como retardo, energía, ancho de banda, etc., cuando entregan los datos hacia el *Nodo de Acceso*. Por lo regular todos los protocolos de enrutamiento tratan de satisfacer alguna de las métricas antes mencionadas. Ejemplos de protocolos que funcionan bajo este esquema son: el protocolo de enrutamiento SAR (Sequential Assignment Routing) propuesto en [Li Y. *et al*,2005] el cual es uno de los primeros protocolos de enrutamiento para WSN que introduce la noción de Calidad de Servicio en las decisiones de enrutamiento. Las decisiones de enrutamiento en SAR dependen de tres factores: recursos de energía, QoS de cada trayectoria, y nivel de prioridad de cada paquete. Para evitar que al fallar una ruta se pierda comunicación entre nodos, el protocolo utiliza un enfoque de trayectorias múltiples y restauración de trayectorias con un manejo de energía eficiente. Aunque este protocolo asegura la tolerancia y rápida recuperación ante fallos, sufre de sobrecarga de mensajes de control en la red para mantener las tablas de enrutamiento y los estados de funcionamiento de cada *Nodo Sensor*, especialmente cuando el número de nodos en la red es elevado. Otro protocolo que maneja parámetros de calidad de servicio es SPEED [He *et al*, 2003] el cual proporciona una entrega de paquetes extremo a extremo en tiempo casi real.

Basados en Trayectorias Múltiples.

El término de enrutamiento por trayectorias múltiples ha sido usado en la literatura para describir la clase de protocolos de enrutamiento que permiten el establecimiento de trayectorias alternas a la trayectoria primaria formada entre un nodo fuente y un nodo destino. Estos protocolos de enrutamiento han sido explorados principalmente por dos razones. La primera de estas es el *balanceo de cargas*: esparcimiento del tráfico entre pares fuente-destino a través de trayectorias disjuntas⁴. Lo cual permite extender el tiempo de vida de la red, ya que al realizar esto existe una distribución más homogénea en el consumo de energía de los nodos. El segundo uso del enrutamiento por trayectorias múltiples es el de

⁴ Trayectorias que no tienen nodos en común.

incrementar la probabilidad de una entrega eficiente de los datos. Esto último puede ser conseguido cuando el nodo fuente transmite múltiples copias de un mensaje a través de las diferentes trayectorias hacia el nodo destino.

La técnica de enrutamiento por trayectorias múltiples, le proporciona a las WSNs la utilización eficiente de la energía de sus nodos, lo cual es un factor fundamental cuando se requiere transmitir bastante tráfico entre un par de nodos fuente-destino. Además le proporciona beneficios como la reducción del congestionamiento de la red mediante el balanceo de tráfico y puede proporcionar calidad de servicio mediante la reducción de retardos y pérdidas de paquetes.

Existen numerosos algoritmos de enrutamiento que basan su funcionamiento en el uso de trayectorias múltiples [Ganesan, D. *et al* ,2000; Nasser, N. y Yunfeng C., 2007; Lu Y. M. y Wong W. S. V., 2007], de los cuales el propuesto por Lou [2005] fue seleccionado por Cortez Vázquez [2006] como base para realizar su propuesta de protocolo de enrutamiento para la Red Inalámbrica de Área Amplia.

IV.2 Protocolo de enrutamiento por trayectorias múltiples hacia un nodo (M a 1).

En los siguientes párrafos se describe el protocolo de enrutamiento que Cortez Vázquez [2006] propone como una alternativa viable para que los nodos sensores de la WAWSN tenga la capacidad de responder a los cambios en la topología de la red.

El funcionamiento de este protocolo de enrutamiento para su análisis se divide en cuatro fases: algoritmo de configuración de la red, solicitud de ruta hacia un nodo sensor (Route Request - RREQ), respuesta a la solicitud de ruta (Route Reply) y recolección de datos.

IV.2.1 Algoritmo de configuración de la red.

El algoritmo M a 1 proporcionado por Lou [2005] es dividido en dos fases. En la primera fase se emplea un mecanismo de inundación consciente, en donde un paquete enviado por el *Nodo de Acceso* condiciona a los demás nodos en la red a seguir una serie de acciones, en donde sin la introducción de paquetes de enrutamiento adicionales, cada *Nodo Sensor* en la red es capaz de obtener múltiples trayectorias hacia el *Nodo de Acceso*. Al final de esta inundación se obtiene un árbol encabezado por la estación base y cuyas ramas del árbol son los nodos vecinos, siendo cada una de estas ramas independientes. El mecanismo en la segunda fase es iniciado de forma independiente en cada *Nodo Sensor* y es utilizado para compartir con los nodos vecinos el conjunto de rutas alternas encontradas en la primera fase, incrementando con esto el número de trayectorias alternas hacia el *Nodo de Acceso*.



Figura16: Formato del mensaje RPRI en el protocolo de enrutamiento M a 1.

El diseño del protocolo de enrutamiento por trayectorias múltiples dado por Cortez Vázquez [2006] involucra solo la primera fase del algoritmo M a 1. En la figura 16 se muestra la estructura del mensaje, que el *Nodo de Acceso* debe difundir periódicamente, para que los nodos sensores tengan rutas actualizadas hacia él. Aquí el identificador del paquete (mtype) será RPRI indicando a los nodos sensores de que se trata de un paquete que sirve para formar el árbol y así descubrir la ruta primaria de cada *Nodo Sensor* hacia el *Nodo de Acceso*. El *mid* identifica el número de actualización de rutas, *nid* es el identificador del nodo que retransmite el paquete, *bid* es utilizado para identificar la rama del árbol, siendo el nodo mas cercano hacia el *Nodo de Acceso*, *cst* es el costo de la trayectoria expresado en número de saltos hacia el *Nodo de Acceso* y en el campo *path* se guardan los identificadores de los nodos sensores por los cuales ha viajado el paquete.

El contenido del mensaje RPRI cuando es transmitido por el *Nodo de Acceso* posee los siguientes valores en cada uno de los campos {RPRI,mid,ID_NododeAcceso, \emptyset ,0, ID_NododeAcceso}. Cada *Nodo Sensor* en la red (que llamaremos z en lo sucesivo) al escuchar el mensaje por primera vez, agregará el nodo *nid* como su vecino y aprenderá la primera ruta para regresar al *Nodo de Acceso* siguiendo la trayectoria en reversa contenida en el campo *path*. Después el nodo z formará un nuevo mensaje RPRI {RPRI, mid, z , (bid == \emptyset)? z : bid, $cst + cost(z, parent(z))$, path + (z)} bajo las siguientes reglas: reemplazar el campo *nid* con su propio identificador de nodo ID (dirección MAC); si el *bid* es \emptyset (indica que es el primer nodo en la rama) colocar en el campo *bid* su propio ID, en otro caso, dejar intacto el campo *bid*; actualizar el campo *cst* de acuerdo a la métrica usada, en este caso el número de saltos del nodo z hacia el *Nodo de Acceso*; actualizar el campo *path* colocando su propio ID al final de la ruta previa. El nodo z difunde este nuevo mensaje a sus vecinos.

En un algoritmo de inundación simple, se ignoran todos los mensajes de actualización de ruta duplicados enviados por otros nodos. Sin embargo, en este algoritmo cuando el nodo z escucha un mensaje duplicado (identificado por el mismo *mid*) revisa el contenido del mensaje para obtener rutas alternas a la primera. Si el mensaje contiene el mismo *bid* que el nodo z , marca a este vecino como *hijo* o *hermano* dependiendo de la *ruta* contenida en el mensaje. Si el mensaje contiene un *bid* diferente, significa que el mensaje proviene de otra rama del árbol y el vecino es marcado como *primo*. Si es el caso, el nodo z puede agregar una ruta alternativa si el campo *ruta* del mensaje recibido es distinto a la ruta principal o a otra ruta de menor costo del nodo z . La propagación del mensaje RPRI se termina cuando todos los nodos lo han difundido una sola vez. Al final de la inundación los nodos conocen a sus vecinos y cuentan con al menos una ruta para regresar al *Nodo de Acceso*. En caso de que una ruta falle, el nodo podrá buscar en su tabla de rutas alternas otra ruta para llegar a la estación base.

IV.2.2 Solicitud de ruta hacia un nodo sensor (Route Request).

Tal como se ha comentado, el algoritmo de enrutamiento por trayectorias múltiples M a 1 es utilizado en aplicaciones que manejan un modelo de entrega de datos dado por eventos,

esto es, los nodos sensores son los nodos fuente que entregan información hacia un nodo destino que en este caso es el *Nodos de Acceso*. Pero en aplicaciones en donde el *Nodo de Acceso* determina en que momento recolectar la información de los nodos sensores, tal y como se tiene contemplado a realizar en la RISDEFVM, los nodos sensores al término de la fase de configuración de la red, no conocen a aquellos que se encuentran más alejados del *Nodo de Acceso*, por lo que no podrían indicarle a este último quien es el nodo siguiente hacia un *Nodo Sensor* en particular. La solución dada por Cortez Vázquez [2006] para que el *Nodo de Acceso* conociera la ruta hacia un *Nodo Sensor* en la red, fue la de utilizar un algoritmo de descubrimiento de rutas hacia dicho *Nodo Sensor*, tal y como se maneja en el protocolo reactivo AODV, en donde un paquete RREQ es difundido por el nodo fuente solicitando ruta hacia un nodo destino.

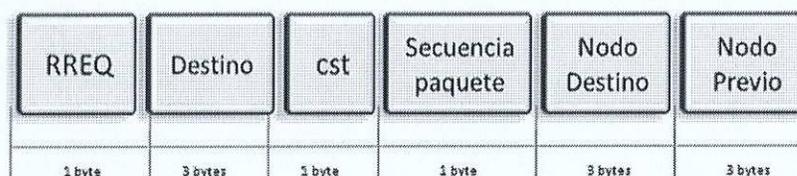


Figura17: Formato del mensaje RREQ en el protocolo de enrutamiento M a 1.

La estructura del paquete RREQ empleado en este protocolo se muestra en la figura 17, la cual cuenta con los campos {RREQ, Destino, cst, Número de secuencia del paquete, Nodo Destino, Nodo Previo}. Cuando el nodo z recibe el mensaje RREQ, revisa el Número de secuencia del paquete y si éste paquete lleva un número de secuencia obsoleto desecha el paquete, en caso contrario actualiza el número de secuencia de paquetes procesados y realiza un análisis en donde verifica si el paquete va dirigido hacia este nodo z , comparando el campo *Nodo Destino* con su propio ID. Cuando el mensaje de búsqueda de un nodo destino no va dirigido hacia el nodo z , este nodo busca en sus tablas de nodos vecinos (hijos, hermanos, primos) si se encuentra en ellas el *Nodo Destino*, si es su vecino le envía a éste el mensaje RREQ colocando en el campo *Destino* la dirección del nodo vecino y en *Nodo Previo* su propio ID. Si el *Nodo Destino* no es su vecino, difunde el mismo mensaje, actualizando el número de saltos y colocando su propio ID en *Nodo Previo*.

IV.2.3 Respuesta de un nodo sensor a la solicitud de ruta (Route Reply).

Al momento en que el paquete RREQ llega al *Nodo Destino*, este nodo genera un paquete RREP de respuesta que será transmitido hacia el nodo especificado en el campo *Nodo Previo* del mensaje RREQ. La estructura del mensaje RREP se muestra en la figura 18 y cuenta con los campos {*RREP*, *Destino*, *Número de secuencia*, *Nodo Origen*, *Nodo Anterior*}. En donde *RREP* es el identificador del paquete, *Destino* es el ID del *Nodo de Acceso*, en *Nodo Origen* se coloca el ID del nodo que genera este paquete de respuesta, y en *Nodo Anterior* se coloca el ID del nodo que retransmite el mensaje. Cuando un nodo *z* recibe el mensaje RREP, actualiza su tabla de Destinos con la información contenida en el mensaje, para tener así el nodo siguiente hacia este destino cuando se le pida, esto es, en el campo *Nodo Destino* de la tabla de enrutamiento se pondrá lo contenido en el campo *Nodo Origen* del paquete RREP; *Nodo Siguiente* será el *Nodo Anterior* de dicho mensaje. El nodo *z* coloca en el campo *Nodo Anterior* su propio ID, busca en su tabla de rutas la primera que almaceno para llegar al *Nodo de Acceso* y envía el mensaje RREP. Si la primera trayectoria almacenada falla, el nodo *z* puede enrutar el paquete por las diversas rutas previamente descubiertas con el algoritmo de configuración de red.

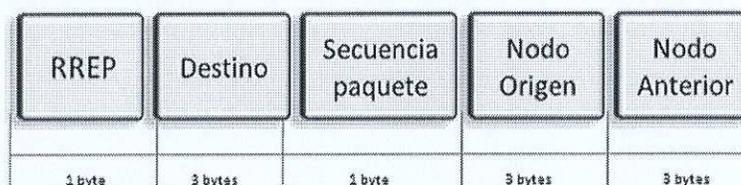


Figura18: Formato del mensaje RREP en el protocolo de enrutamiento M a 1.

IV.2.4. Recolección de Datos.

Después de que el paquete RREP recorre alguna de las numerosas trayectorias descubiertas hacia el *Nodo de Acceso*, este último estará listo para empezar con la recolección de los datos de la tarjeta de adquisición con la transmisión de un paquete de PETICION, cuya estructura del mensaje se muestra en la figura 19. Este mensaje esta compuesto por los campos {*PETICION*, *Destino*, *TipoComando*, *MPTR*}. El campo *PETICION* es el

identificador de paquete, *Destino* es empleado por el nodo *z* para buscar en su tabla de enrutamiento el nodo siguiente hacia ese *Destino*, en *Tipo de Comando* se especifica la acción a realizar con la tarjeta de adquisición de datos del *Nodo Destino*, dichas acciones comprenden el conocer el número total de arreglos almacenados en la memoria interna de la tarjeta de adquisición, ubicar el apuntador de la memoria para empezar a descargar los arreglos a partir de la posición especificada y la petición de arreglos de datos.

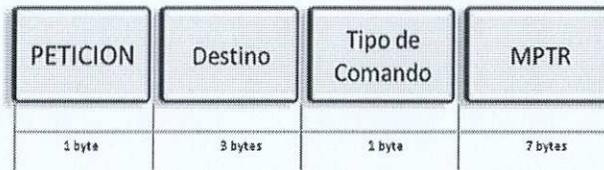


Figura19: Formato del mensaje PETICION en el protocolo de enrutamiento M a I.

La estructura del paquete de DATOS, ACK y del mensaje de ERROR_LOGGER se muestran en la figura 20, en donde se puede observar que tienen la misma estructura de los paquetes empleado en el algoritmo de enrutamiento de tablas estáticas con trayectorias definidas dado por Cortez Vázquez [2006] en su tesis.

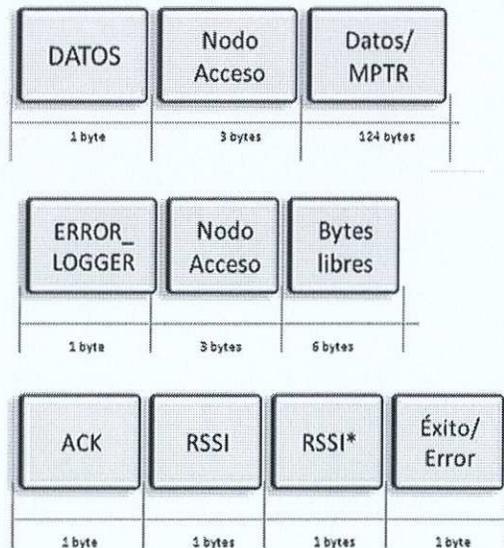


Figura20: Formato de los mensajes DATOS, ERROR_LOGGER y ACK en el protocolo de enrutamiento M a I.

IV.3 Protocolo de enrutamiento por trayectorias Múltiples a Múltiples nodos (M a M).

En el diseño de los protocolos de enrutamiento para WSNs, se asume que siempre podrían ser formadas trayectorias múltiples entre un par de nodos fuente y destino, debido al gran número de nodos desplegados en este tipo de redes. Pero cuando se tiene una WSN con un número pequeño de nodos, como la WAWSN (9 nodos), existe la posibilidad de que surjan problemas de nodos aislados. Esta situación se presenta cuando el único nodo que le ofrece a otro una trayectoria hacia el *Nodo de Acceso*, falla por factores como bajo nivel de energía, o mal funcionamiento de la parte física del nodo, por lo que acciones correctivas deben ser tomadas en cuenta para evitar el aislamiento de un nodo.

En lo sucesivo se discutirá el funcionamiento del protocolo que se propone en esta tesis como alternativa al protocolo de enrutamiento por trayectorias múltiples M a 1 discutido en la sección anterior. Éste trata de resolver problemas (nodos aislados) que se presentan en redes con pocos nodos, y saca ventaja de las condiciones que se tienen en la RISDEFVM, en lo que respecta a los recursos energéticos de la red (panel solar y baterías recargables).

El protocolo de enrutamiento maneja cuatro fases: descubrimiento de nodos vecinos, solicitud de ruta hacia un nodo sensor (Route Request), respuesta del nodo sensor a la solicitud de ruta (Route Reply), Recolección de datos.

IV.3.1. Descubrimiento de nodos vecinos e integración a la red.

Un nodo en la red ejecuta esta fase cuando es conectado por primera vez o cuando el nodo detecta que se encuentra aislado. En primera instancia todos los nodos que quieren integrarse o reincorporarse a la red se consideran como nodos aislados por lo que la fase comienza cuando estos nodos envían un paquete HOLA_Aislado a los nodos vecinos que

alcance a dar cobertura con la potencia inicial del *Nodo Aislado*. La estructura del paquete es mostrada en la figura 21. Este paquete contiene dentro de sus campos el *Identificador de paquete*, en donde se especifica si el nodo se encuentra aislado o se encuentra enviando mensajes consecutivos de integración, *Destino* en donde se indica que es un mensaje tipo *Broadcast* que será transmitido hacia todos los vecinos que se encuentren dentro alcance de transmisión, *Nodo Fuente* indica el ID del nodo que generó este mensaje para integrarse a la red, *cst* es el número de saltos hacia el *Nodo de Acceso* y cuyo valor es infinito cuando el nodo se encuentra aislado. El estado del funcionamiento de la tarjeta de adquisición de datos y el nivel de energía de la batería se encuentran contenidos en los campos *TA* y *Bat* respectivamente, *Alerta* indica si en la ubicación del *Nodo Sensor* se ha presentado algún evento externo que sea importante darlo a conocer a los usuarios de la red, *Ptx* es la potencia con la cual fue transmitido el paquete, *RSSI* es la intensidad de potencia con la que el *Nodo Vecino* recibe el paquete del *Nodo Fuente* y esta dado por la *API Receive Packet* del Radio AC4790-1000, *Periódico* indica si el mensaje esta siendo utilizado para verificar que sus vecinos se encuentran todavía vigentes.

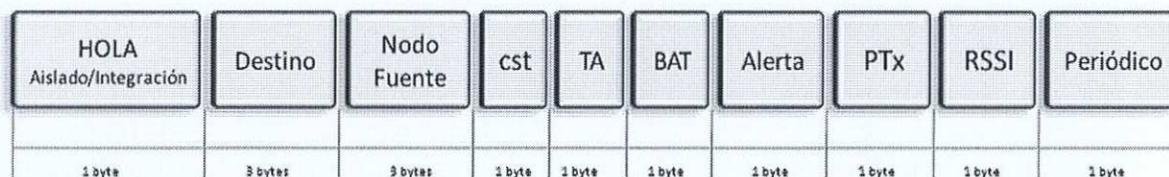


Figura21: Formato del mensaje HOLA AISLADO/INTEGRACION en el protocolo de enrutamiento M a M.

El *Nodo Vecino* al recibir un mensaje HOLA_Aislado realiza un procesamiento del paquete, en el cual, lo primero que analiza es el campo *RSSI* y *Ptx* del mensaje que esta recibiendo y realiza una comparación del valor contenido en *RSSI* con el de un valor de recepción (umbral) configurado por los usuarios de la red. Cuando el valor del *RSSI* esta por debajo de este umbral el mensaje es desechado, asegurando con esto empíricamente solo enlaces inalámbricos confiables. En caso contrario, si el valor *RSSI* esta por arriba del umbral realiza una posterior verificación en donde se pregunta si el nodo que le envía el mensaje lo tiene agregado en su tabla de vecinos. Si ya lo tiene agregado desecha el

paquete y regresa al ciclo principal del programa, en caso contrario, agrega el ID contenido en el campo *Nodo Fuente* en su Tabla de Vecinos junto con los demás valores de los campos que vienen en el paquete.

Al ser un paquete que indica que el nodo se encuentra aislado, el *Nodo Vecino* antes de transmitir el paquete Respuesta_HOLA, verifica si la potencia con la que se transmitió el paquete de HOLA_Aislado se encuentra por arriba de la potencia configurada en el *Nodo Vecino*, si esto es cierto, el *Nodo Vecino* cambiará su potencia ajustándose a la que viene en el campo *Ptx* del paquete HOLA_Aislado para así poder comunicarse con el *Nodo Aislado*. La estructura del mensaje Respuesta_HOLA se especifica en la figura 22. En él se indica que nodo le esta respondiendo a la solicitud de integración (*Nodo Vecino*), el número de saltos en que se encuentra el *Nodo Vecino* hacia el *Nodo de Acceso* (*cst*), estado de la tarjeta de adquisición y nivel de batería del *Nodo Vecino* (*TA* y *BAT*), así también la potencia con la que transmite el mensaje de respuesta y la intensidad de potencia con la que el nodo que se encontraba aislado recibe el paquete de respuesta del *Nodo Vecino*.

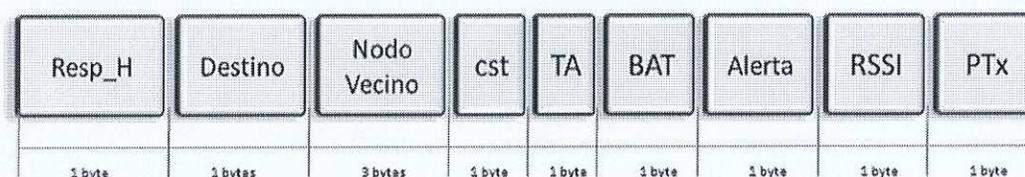


Figura22: Formato del mensaje Respuesta_HOLA en el protocolo de enrutamiento M a M.

Al recibir la respuesta el nodo que solicitó la integración (*Nodo Fuente*), verifica si el ID del *Nodo Vecino* se encuentra en su Tabla de Vecinos, si no lo encuentra, agrega al nodo que le envió el paquete en dicha tabla. Si ya lo tiene agregado, solo actualiza el campo de número de saltos hacia el *Nodo de Acceso* con el valor en el campo *cst* del paquete de respuesta. Al ser la solicitud de integración un paquete tipo Broadcast es probable que el *Nodo Fuente* reciba más de un mensaje de respuesta, enviados por otros *Nodos Vecinos*. Dichos mensajes serán analizados como se ha descrito para que el *Nodo Fuente* se integre completamente a la red.

Ahora bien si el nodo que se encuentra aislado, no recibe respuesta a su solicitud de integración después de un tiempo t_i , o si los *Nodos Vecinos* que le han contestado no tienen un número de saltos válido ($\neq \infty$) hacia el *Nodo de Acceso*, transmite n_i veces un mensaje tipo HOLA_Integración con la misma potencia con la que envió el mensaje HOLA_Aislado. La transmisión de estos mensajes son utilizados para aumentar la probabilidad de que algún *Nodo Vecino* que no haya podido recibir mensajes previos, lo reciba y pueda contestarle al *Nodo Aislado*.

En el momento que el *Nodo Vecino* recibe un paquete HOLA_Integración verifica si el *Nodo Fuente* ya se encuentra agregado en su Tabla de Vecinos. Si no lo encuentra, agrega al *Nodo Fuente* en dicha tabla, contestándole con un mensaje de respuesta siguiendo las mismas acciones comentadas para el mensaje HOLA_Aislado. Si ya lo tiene agregado como vecino, solo actualiza el campo número de saltos hacia el *Nodo de Acceso* en la Tabla de Vecinos, con el valor del campo *cst* que lleva el paquete.

Si el *Nodo Aislado* después de transmitir los n_i mensajes de integración no consigue conectarse con un *Nodo Vecino* que le ofrezca un número de saltos válido hacia el *Nodo de Acceso*, éste cambiará de potencia a una mayor para así aumentar el área de cobertura y transmitirá un paquete de difusión HOLA_Aislado, repitiendo lo comentado anteriormente hasta que encuentre a un *Nodo Vecino* que le proporcione esa integración a la red o haya llegado a la máxima potencia de transmisión, que en cuyo caso el *Nodo Aislado* se quedará en un ciclo tratando de integrarse a la red. Bajo este esquema se asegura que Redes inalámbricas con pocos nodos establezcan enlaces inalámbricos con otros, evitando en lo posible que los nodos se encuentren aislados.

Para mantener actualizada la Tabla de Vecinos y detectar cuando un nodo se encuentra aislado, se transmiten mensajes periódicos cada tiempo t_p , en donde los nodos que reciben este mensaje ratifican su existencia enviando mensajes de respuesta hacia el nodo que envió el mensaje periódico. Al recibir el nodo los mensajes de respuesta, después de un determinado tiempo, ejecuta un mecanismo de ajuste de ubicación del nodo con respecto al

Nodo de Acceso, valiéndose de la información del campo *cst* de los nodos vecinos ratificados. Si el nodo detecta que se encuentra aislado, permanece en esta fase hasta que logre conectarse con un *Nodo Vecino* válido.

IV.3.2.2 Solicitud de ruta hacia un nodo sensor (Route Request).

Cuando el *Nodo de Acceso* requiere recolectar la información de la tarjeta de adquisición de algún nodo de la red y no conoce la ruta hacia ese nodo, inicia la fase de descubrimiento de ruta hacia el *Nodo Sensor* (que en lo sucesivo llamaremos *Nodo Destino*), difundiendo un mensaje de solicitud de ruta RREQ (Route Request) similar a como se maneja en el protocolo AODV, solo que a diferencia de este, se guarda la trayectoria que ha recorrido el mensaje hasta llegar al *Nodo Destino*, similar a como se ejecuta en el protocolo DSR. Esto con la finalidad de que cada nodo que se encuentra en el trayecto entre el *Nodo de Acceso* y *Nodo Destino* conozca múltiples trayectorias de regreso al *Nodo de Acceso*.

La estructura del mensaje se muestra en la figura 23. El paquete esta compuesto por un *Identificador de mensaje (RREQ)*, un *número de secuencia*, contador de saltos que ha realizado antes de llegar al *Nodo Destino (cst)*, ID del *Nodo Destino* y trayectoria que ha recorrido el paquete.

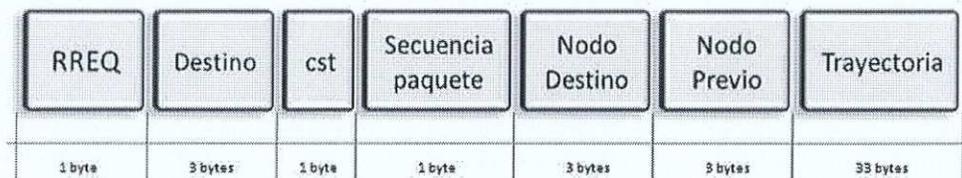


Figura23: Formato del mensaje RREQ en el protocolo de enrutamiento M a M.

Al llegar este mensaje a un nodo que no es el *Nodo Destino*, procesa el mensaje comparando el número de secuencia del paquete con el que tiene almacenado dado por un mensaje procesado con anterioridad. Si el paquete que llegó ya ha sido procesado por el nodo, entonces antes de desecharlo, verifica la trayectoria que ha recorrido el paquete,

guardando solo aquellas trayectorias que ofrezcan una ruta alterna a las que se tienen ya almacenadas en su tabla de enrutamiento. El enfoque utilizado es similar a la primera fase del protocolo de enrutamiento por trayectorias múltiples M a 1, pero a diferencia de este, aquí con un solo mensaje se forman las múltiples trayectorias hacia la estación base y se busca el *Nodo Destino*. Si el paquete no ha sido procesado, almacena como trayectoria primaria la que ha seguido este mensaje y a su vez realiza un procedimiento en el cual verifica si el ID *Nodo Destino* que viene en el mensaje se encuentra dentro de su Tabla de Vecinos, si es así le retransmite el mensaje RREQ de forma unidireccionada (*Unicast*), en caso contrario, el paquete se retransmite a todos sus vecinos (*Broadcast*), después de un retardo pseudoaleatorio, agregando el ID del nodo que ha procesado el paquete en el campo de *Trayectoria* e incrementando en uno el costo (*cst*) de la trayectoria.

IV.3.3. Respuesta de un nodo sensor a la solicitud de ruta (Route Reply).

Considerando la posibilidad de que múltiples mensajes RREQ provengan de diferentes *Nodos Previos* hacia el *Nodo Destino*, este último le responderá a cada uno de ellos con un mensaje *Unicast* de respuesta RREP (Route Reply) conforme vayan llegando. La estructura del mensaje se muestra en la figura 24. En este mensaje se manejan campos como *Identificador* de paquete, *Destino* en donde es colocado el ID del *Nodo de Acceso*, *número de secuencia*, ID del nodo que origina este paquete de respuesta (*Nodo Origen*), nodo que retransmite el mensaje (*Nodo Anterior*), y a diferencia del mensaje RREP utilizado en el protocolo de enrutamiento por trayectorias múltiples M a 1, se tiene un contador de saltos hacia el *Nodo Destino* (*cst*) y la trayectoria recorrida por el paquete. El agregar estos dos últimos campos, le proporcionan a los nodos que retransmiten este mensaje, conocer a más posibles destinos, múltiples nodos siguientes hacia el destino y el costo que se tendría al escoger alguno de ellos. La estructura de este tipo de mensaje le ofrece al *Nodo de Acceso* múltiples trayectorias hacia el *Nodo Destino*, así también la información necesaria para enrutar paquetes hacia alguno de los nodos que forman la trayectoria.

Cuando nodos intermedios entre el *Nodo Destino* y el *Nodo de Acceso* reciben un mensaje RREP, lo primero que realizan es una verificación del número de secuencia del paquete, por lo que el mensaje que se reciba primero con un número de secuencia más actual que el que se tiene almacenado, será el que se retransmitirá por todas las trayectorias formadas hacia el *Nodo de Acceso*. Antes de retransmitir el mensaje el nodo intermedio actualizará su número de secuencia de paquetes RREP procesados, y guardará en su Tabla de Destinos el ID contenido en el campo *Nodo Origen* del paquete RREP y como *Nodo Siguiente* hacia ese destino el ID contenido en *Nodo Anterior*. Siguiendo el mismo procedimiento almacenará en su Tabla de Destinos a todos aquellos nodos que han procesado este mensaje. Los paquetes con el mismo número de secuencia que llegan a este nodo intermedio, no serán retransmitidos y antes de eliminarlos, el nodo almacenará en la Tabla de Destinos a todos los nodos que han procesado el paquete. El proceso termina cuando todos los nodos han retransmitido el paquete RREP por sus múltiples trayectorias, dando como resultado que los nodos que han procesado este paquete tengan múltiples *Nodos Siguientes* hacia el *Nodo Destino*.

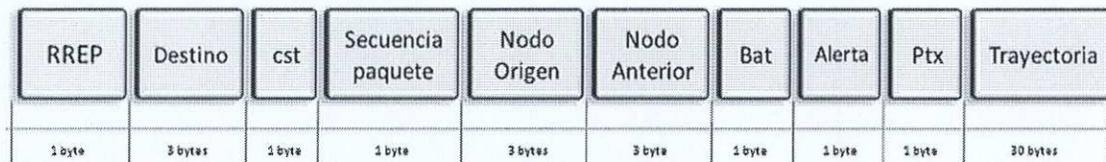


Figura24: Formato del mensaje RREP en el protocolo de enrutamiento M a M.

IV.3.4. Recolección de Datos.

La recolección de datos inicia con la transmisión de paquetes de PETICION por parte del *Nodo de Acceso*. Dichos paquetes son utilizados para conocer el número de arreglos almacenados en la tarjeta de adquisición del *Nodo Destino*, para indicarle a este nodo el tipo de descarga que se realizará (completa o parcial) y para empezar a recolectar los arreglos de datos. El mensaje de PETICION es mostrado en la figura 25. La estructura de este mensaje difiere del utilizado en el protocolo de enrutamiento M a 1 al agregarle el campo *Nodo Anterior*, utilizado para resolver problemas en la transmisión de un paquete

hacia el *Nodo Destino* y *número de secuencia*, el cual sirve para que el *Nodo de Acceso* maneje un control del número de mensajes de PETICION hacia ese destino.

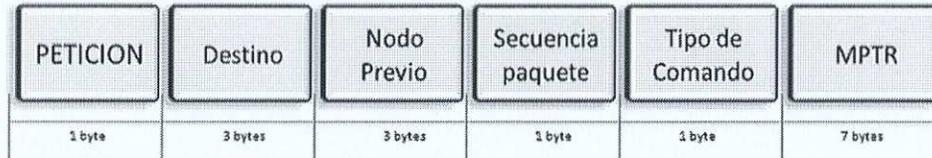


Figura25: Formato del mensaje PETICION en el protocolo de enrutamiento M a M.

En esta fase se ejecuta un mecanismo que trata de resolver la problemática que surge cuando uno de los nodos intermedios en la trayectoria *Nodo de Acceso - Nodo Destino* sale de la red sin previo aviso. Cuando un nodo intermedio recibe un paquete de PETICION, lo primero que realiza es identificar para quien va dirigido el paquete, después busca en sus tablas de enrutamiento los posibles *Nodos Siguietes* hacia ese *Nodo Destino* y por último trata de enrutar el paquete por la trayectoria con el menor costo (número de saltos). Si el nodo intermedio no recibe un mensaje ACK exitoso después de retransmitir un número determinado de veces el paquete hacia el *Nodo Siguiete* seleccionado, puede intentar enrutar nuevamente el paquete hacia otro *Nodo Siguiete* de los que tenga almacenados. En caso de que el nodo intermedio no tuviera más *Nodos Siguietes* hacia ese *Nodo Destino*, enviará un paquete denominado ERROR_RUTA hacia el *Nodo Anterior* en el trayecto *Nodo de Acceso - Nodo Destino*. La estructura del paquete es mostrada en la figura 26. Este paquete dentro de sus campos cuenta con uno en donde se especifica el *Nodo Destino*, el nodo que no pudo entregar la PETICION (*Nodo Error*), los ID de los nodos que se volvieron inalcanzables (*ID Fallidas*) y el *paquete de PETICION* que no fue entregado.

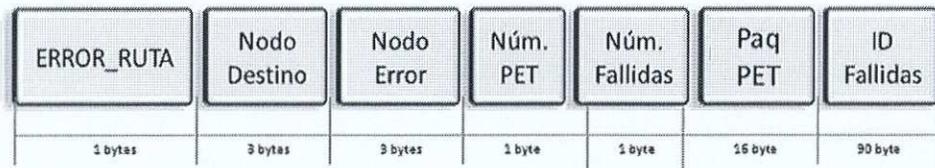


Figura26: Formato del mensaje ERROR_RUTA en el protocolo de enrutamiento M a M.

El *Nodo Anterior*, al recibir este paquete lo procesa eliminando de sus tablas de enrutamiento todos aquellos IDs fallidos que vienen en el mensaje ERROR RUTA e intenta retransmitir este paquete de PETICION hacia el *Nodo Destino* a través de alguno de los *Nodos Siguietes* que tenga aún almacenados en su Tabla de Destinos. El *Nodo Anterior* si no encuentra *Nodos Siguietes*, repite el procedimiento antes mencionado hasta que el mensaje ERROR_RUTA llega al *Nodo de Acceso*. En donde él podrá decidir entre cambiar de trayectoria o iniciar nuevamente la búsqueda de rutas hacia el *Nodo Destino* si no posee más trayectorias almacenadas.



Figura27: Formato de los mensajes de DATOS, ERROR_LOGGER y ACK en el protocolo de enrutamiento M a M.

Ahora bien, cuando se encuentran los nodos sensores transmitiendo un mensaje de DATOS hacia el *Nodo de Acceso*, existe la posibilidad de que un nodo intermedio no pueda entregar el paquete a otro en el trayecto *Nodo Destino-Nodo de Acceso*, por lo que este nodo tratará de enrutar el paquete por otra trayectoria de las que tenga almacenadas, eliminando de su Tabla de Trayectorias aquella que no funcionó. En el momento en que el nodo intermedio no tenga más trayectorias hacia el *Nodo de Acceso*, se quedará en espera de un nuevo mensaje para formar trayectorias. La estructura de los mensajes DATOS, ERROR_LOGGER y ACK son mostrados en la figura 27.

Implementación de temporizadores y protocolos de enrutamiento.

En este capítulo se presentará el diseño y la implementación de un mecanismo generador de retardos pseudoaleatorios y de un Reloj de Tiempo Real (RTC), dado que estos son parte fundamental para llevar a cabo las fases de los protocolos de enrutamiento por múltiples trayectorias diseñados y comentados con anterioridad. Así también, mediante diagramas de flujo generalizados se explica el funcionamiento de los protocolos de enrutamiento implementados en los diferentes microcontroladores de las interfaces inalámbricas.

V.1. Generación de retardos pseudoaleatorios en el microcontrolador.

Para poder generar tiempos de espera (retardos) en un sistema embebido, es necesario utilizar el dispositivo destinado a gobernar los tiempos, el cual recibe el nombre de temporizador ó "TIMER". Éste básicamente, consiste en un contador ascendente o descendente que genera un tiempo proporcional al valor que se le carga. El tiempo de cuenta se agota al momento en que se produce su desbordamiento o paso por cero.



Figura28: Esquema simplificado de un temporizador.

Los microcontroladores de Microchip de la gama 18 poseen por lo regular 4 temporizadores de 8 o 16 bits (Timer0, Timer1, Timer2 y Timer3), los cuales pueden funcionar como contadores síncronos y asíncronos de eventos externos o temporizadores cuya duración esta en función de la frecuencia de oscilación de una señal de reloj, el valor cargado en su registro de cuenta y de la configuración de su circuito de divisor de frecuencias [Angulo Usategui, 2003].

Al realizar una investigación sobre las características de cada uno de los temporizadores del microcontrolador, se encontró que el mas apropiado para generar una amplia variedad de tiempos fue el Timer0 (TMR0) en modo de 16 bits. Para obtener el periodo de desborde que genera una interrupción al microcontrolador, se utiliza la ecuación (1).

$$\text{Periodo del desborde} = \frac{4 \times \text{Preescaler} \times (2^{\text{num bits}} - \text{Valor en el TMR})}{F_{osc}} \quad (1)$$

en donde F_{OSC} es la frecuencia del oscilador primario, *Preescaler* es el circuito programable que divide la frecuencia de operación, que en el caso del TMR0 divide la frecuencia en intervalos de 2^1 a 2^8 , *num bits* es el número de bits del temporizador y *Valor en el TMR* es el dato que se carga al registro de 16 bits del temporizador.

Considerando que la frecuencia de operación del microcontrolador (F_{OSC}) empleada en las interfaces inalámbricas diseñadas es de 4Mhz, el valor cargado en el registro *TMR0* es cero, indicando con esto que se deberá recibir el máximo número de impulsos antes de desbordarlo, para los diferentes valores en el *Preescaler*, se pueden generar temporizaciones desde 135 ms hasta 16.7segundos.

Por lo que para aprovechar esta amplia ventana de tiempo que puede manejar el temporizador para generar retardos, se desarrolló un mecanismo de generación de

secuencias pseudoaleatorias⁵ que son adaptadas a los circuitos controladores del temporizador. El principio de operación de este mecanismo se basa en dos Registros de Desplazamiento Realimentados Linealmente (Linear Feedback Shift Registers), uno para cargar valores en el *TMRO* y otro para seleccionar pseudoaleatoriamente los valores en el *Preescalador*.

Los LSFR están constituidos por un conjunto de L etapas o celdas de memoria interconectadas mediante puertas lógicas OR exclusivas. Las celdas de memoria están unidas entre si, de tal forma que cada pulso de reloj recibido hace avanzar el contenido de cada una de ellas y la carga en la celda adyacente correspondiente, en función del sentido de avance elegido (desplazamiento del bit hacia la izquierda o derecha). La primera celda se carga con un valor obtenido del resultado de una operación XOR entre dos celdas de memoria, con lo que queda el sistema con un lazo cerrado por esta retroalimentación. Se pueden identificar las conexiones de realimentación con los coeficientes de un polinomio $f(x)$ en el cual, si existe un término dentro del polinomio (x^2 , x^3 , etc.), se considera que la celda asociada a él contribuye a la obtención de la realimentación. A este polinomio $f(x)$ se le suele llamar polinomio característico. Como se puede observar en la figura 29 el polinomio característico del *LFSR* es $f(x) = x^3 + x + 1$, observándose la realimentación en la primera y tercera celda.

Al conjunto de todas las secuencias finitas binarias generadas mediante el polinomio $f(x)$ se le llama espacio de soluciones, que es un espacio n -dimensional sobre los campos de Galois $GF(2)$ [Cruselles Forner E. y Melús Moreno J.L., 1996] en el que se definen las operaciones multiplicación y suma módulo 2 .

Una cuestión importante que se debe tener en cuenta, es que la salida del registro de desplazamiento es periódica, lo cual quiere decir que cada registro repetirá su contenido cada cierto tiempo. Limitando el número de estados diferentes del *LFSR* y que dependerá,

⁵ Las secuencias pseudoaleatorias son una sucesión de números que tienen un periodo y que el orden en que se generan dependerá del valor inicial (semilla) dado al generador de la secuencia.

además, de cuál sea su número de registros (orden), de su estado inicial y de las conexiones del polinomio de realimentación.

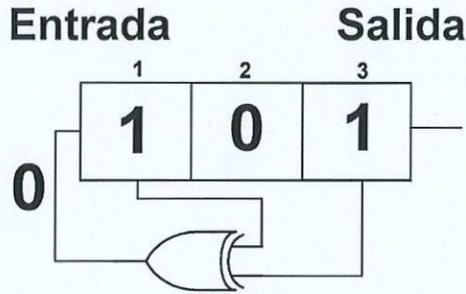


Figura29: LFSR del polinomio primitivo $x^3 + x + 1$.

Para un LFSR, si $f(x)$ tiene grado L y es primitivo [Sánchez García J., 2006], el periodo P de cualquier secuencia no nula será $P = 2^L - 1$. Un polinomio irreducible de grado L será un polinomio primitivo sobre un campo finito $GF(2)$ cuando haga que la salida de un LFSR tenga un periodo máximo $2^L - 1$ (longitud máxima).

Esto implica que el registro de desplazamiento recorrerá $2^L - 1$ estados no nulos antes de repetirse, como se observa en la tabla IV al utilizar un polinomio de grado 3 se tendrán 7 desplazamientos antes de que se vuelva a repetir el contenido del LFSR. El hecho de que sean $2^L - 1$ estados y no 2^L se debe a que el estado inicial todo ceros debe evitarse siempre, ya que llevaría al LFSR a generar continuamente la secuencia cero.

Tabla IV. Secuencia generada por el polinomio $x^3 + x + 1$

Desplazamientos	Secuencia	Bit Salida	Resultado XOR
inicio	111	1	0
1	011	1	1
2	101	1	0
3	010	0	0
4	001	1	1
5	100	0	1
6	110	0	1
7	111	1	0

Los polinomios primitivos utilizados en el mecanismo de generación de retardos pseudoaleatorios con el microcontrolador son $f_{preescaler}(x)=x^3+x+1$ que genera 7 valores de números binarios como los que se muestran en la tabla III, los cuales son utilizados para accionar al circuito del divisor de frecuencias. Así como $f_{TMRO}(x)=x^6+x+1$ que genera 63 valores que son cargados en el registro TMR0. Estos dos polinomios trabajando en conjunto pueden generar hasta 441 valores de tiempos diferentes en una ventana de 16 segundos.

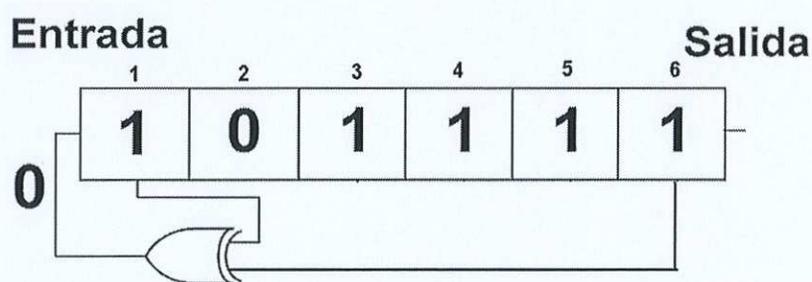


Figura30: LFSR del polinomio primitivo x^6+x+1 .

V.2. Generación de un Reloj de Tiempo Real (RTC) en el microcontrolador.

Para generar un RTC en el microcontrolador, existen dos maneras de realizarlo, la primera de ellas es utilizando componentes especiales como un oscilador de 32.768 kHz para darle la precisión debida al Timer1 del microcontrolador [PIC18F87J50, 2005]. La segunda opción es utilizar uno de dos temporizadores (Timer1, Timer3) junto con un modulo comparador (CCP1, CCP2) de los 5 disponibles en el microcontrolador. Si se optara por la segunda opción, no se añadirían componentes extras a las interfaces inalámbrica construidas y se podría manejar una precisión aceptable.

En el desarrollo de este RTC con la segunda opción, se utiliza el Modulo CCP1 en modo de comparación con disparo especial junto con el Timer1 (TMR1) como contador síncrono. La forma en como operan en conjunto es descrita a continuación de manera muy general.

El modulo CCP1 compara en cada ciclo de instrucción el valor de su registro CCPR1 con el valor de cuenta del registro TMR1, esta comparación se realiza sin añadir código al programa principal. Cuando el valor del registro CCPR1 coincide con el registro del temporizador se produce una interrupción, que en este caso es utilizada para modificar el valor de las variables que representan al reloj (Horas, Minutos, Segundos, Milésimas). Al mismo tiempo que se genera esta interrupción, el microcontrolador restablece el TMR1 para que vuelva a iniciar su cuenta, esto sin que se pierdan microsegundos como sucede cuando se inicializa por programa, proporcionando así una precisión en el tiempo del reloj.

Para poder determinar el valor que se debe cargar en el registro CCPR1, se utilizan las ecuaciones 2 y 3. Las cuales involucran la frecuencia de oscilación del reloj primario, el valor en el circuito divisor de frecuencias y el periodo en el cual se desea que se genere la interrupción.

$$Val\ del\ TMR1 = \frac{4 \times Preescaler \times 2^{16} - (Periodo\ del\ desborde \times F_{osc})}{4 \times Preescaler} \quad (2)$$

$$Valor\ en\ CCPR1 = 2^{16} - Val\ del\ TMR1 \quad (3)$$

Por lo tanto si se quiere un reloj dentro de la interfaz inalámbrica cuyo tiempo de actualización sea cada 50ms, el valor con el que se tiene que cargar el registro del modulo comparador, después de haber configurado correctamente los registros que determinan el funcionamiento de los comparadores (TIMER3,CCP1), es de 6,250.

El diagrama de flujo que representa al código del RTC en la rutina al servicio de la interrupción se muestra en la figura 31 y el tiempo medido con un osciloscopio digital que comprueba su precisión se observa en la figura 32.

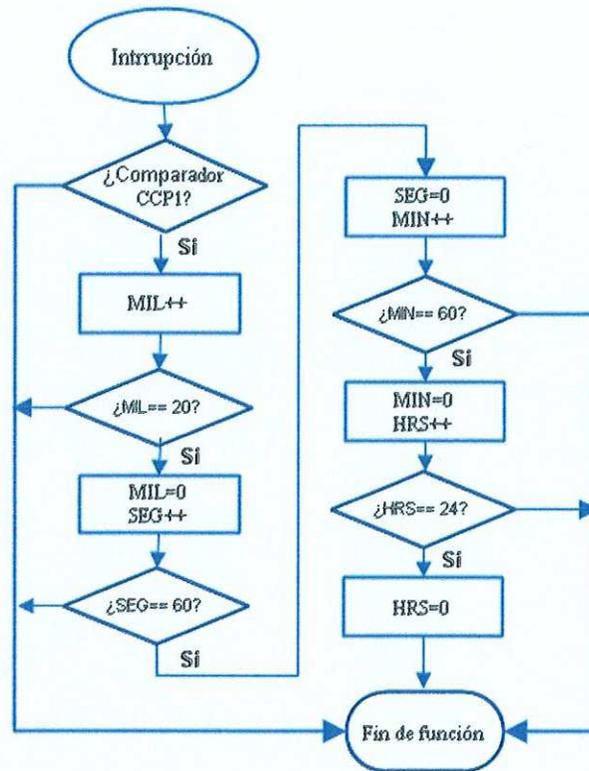


Figura 31: Diagrama de flujo de la rutina al servicio de la interrupción que genera al RTC.

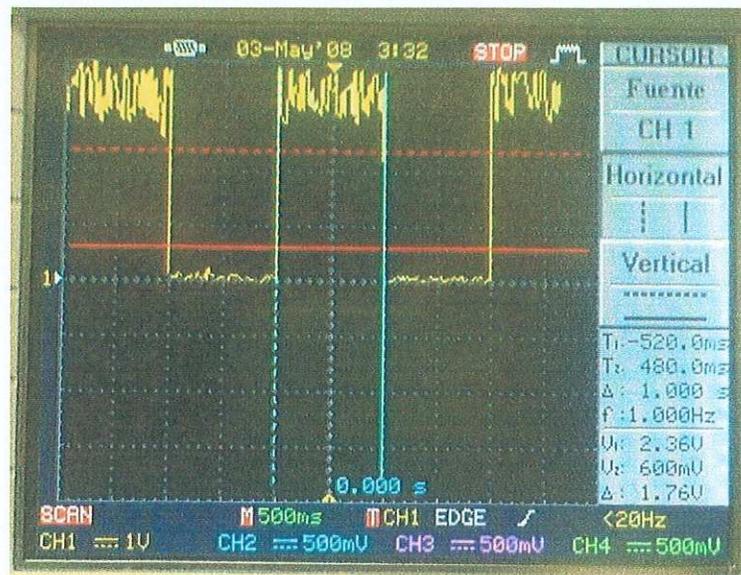


Figura 32: Lectura con el osciloscopio del tiempo generado por el RTC programado en la interfaz inalámbrica.

V.3. Implementación del protocolo de enrutamiento por trayectorias múltiples a un nodo (M a 1).

Para poder implementar este protocolo de enrutamiento en los diferentes modelos de las interfaces inalámbricas, fue necesario adecuar el código escrito para el microcontrolador del primer modelo de interfaz inalámbrica (PIC18F452), hacia los microcontroladores utilizados en el segundo y tercer modelo, PIC18F2550 y PIC18f67J50 respectivamente. Esto se llevó a cabo modificando los archivos del proyecto (*.h*.lkr) siguiendo las recomendaciones dadas por Toquebeuf R. y Lycée C.D.[2007], los bits de configuración [MCC18,2008], así como la habilitación de algunos de los recursos de cada microcontrolador (Interrupciones, Comparadores y Temporizadores), los cuales son empleados para los nuevos esquemas de funcionamiento propuestos (reloj interno, retardos pseudoaleatorios).

Como se comentó en el capítulo anterior, el protocolo de enrutamiento M a 1 cuenta con dos fases en donde se transmiten mensajes de difusión (RPRI y RREQ) hacia todos los nodos sensores en la red. Al ser mensajes tipo *Broadcast*, la tarjeta de comunicación inalámbrica AC4790-1000 no asegura la entrega de este mensaje hacia sus vecinos, esto es, si la API o el hardware de acuse de mensaje recibido se encuentran habilitados, al transmitir este tipo de mensajes siempre le indicarán al microcontrolador que fueron recibidos correctamente por los nodos en la red. Pero puede presentarse el caso como lo menciona Cortez Vásquez [2006], en el que un *Nodo Vecino* no pueda recibir un mensaje de estas características correctamente, debido a colisiones originadas por la transmisión de paquetes de otros nodos al mismo tiempo. La solución que propone Cortez Vásquez [2006] para corregir tal situación, fue la de agregar al código de su algoritmo de enrutamiento, un mecanismo que genere retardos aleatorios para que los nodos no transmitan los mensajes de difusión al mismo tiempo.

Así que el agregar al código escrito el mecanismo de generación de retardos pseudoaleatorios en el microcontrolador, visto en la sección anterior, ofrece una alternativa viable para solucionar de manera activa el problema presentado en la difusión de paquetes en la red.

El añadir más funcionalidades al protocolo de enrutamiento, implicó que se realizaran modificaciones al código ya escrito que se tenía al comenzar la tesis. Dentro de estas modificaciones que se realizaron al programa del protocolo se tiene la habilitación de la interrupción por desbordamiento del TMR0 (ocupado por el generador de retardos pseudoaleatorios), la interrupción por recepción de bytes por el puerto serie (cuando se implementa sobre el tercer modelo de la interfaz se habilita la interrupción en ambos puertos serie) y la interrupción generada por el módulo comparador CCP1 (utilizada para actualizar el RTC). Se agrego además una pila de datos tipo FIFO (First Input-First Output) de n_p niveles de 52 bytes, utilizada para almacenar el paquete de difusión que será retransmitido después del retardo pseudoaleatorio. El número n_p de niveles de la pila de datos es variable y depende de la memoria de datos de cada microcontrolador.

El diagrama de flujo del programa principal implementado en los nodos sensores, al realizar estas modificaciones queda como se muestra en la figura 33, en donde las formas con líneas punteadas muestran lo que se le agregó al programa dado por Cortez Vázquez [2006]. Este diagrama muestra de manera resumida las acciones ejecutadas por el *Nodo Sensor* en función de los tipos de paquetes recibidos de otro nodo de la red. Como se puede observar estas acciones involucran a las cuatro fases del protocolo comentado en el capítulo anterior.

El diagrama de flujo de la rutina de interrupción se muestra en la figura 34. Se puede observar que en esta rutina es en donde se realiza la identificación del paquete que se esta recibiendo por el puerto serie, la modificación de las variables del reloj y la activación de la bandera para que se transmita el paquete de difusión que se encuentra esperando a salir de la pila de datos (al finalizar la rutina de interrupción).

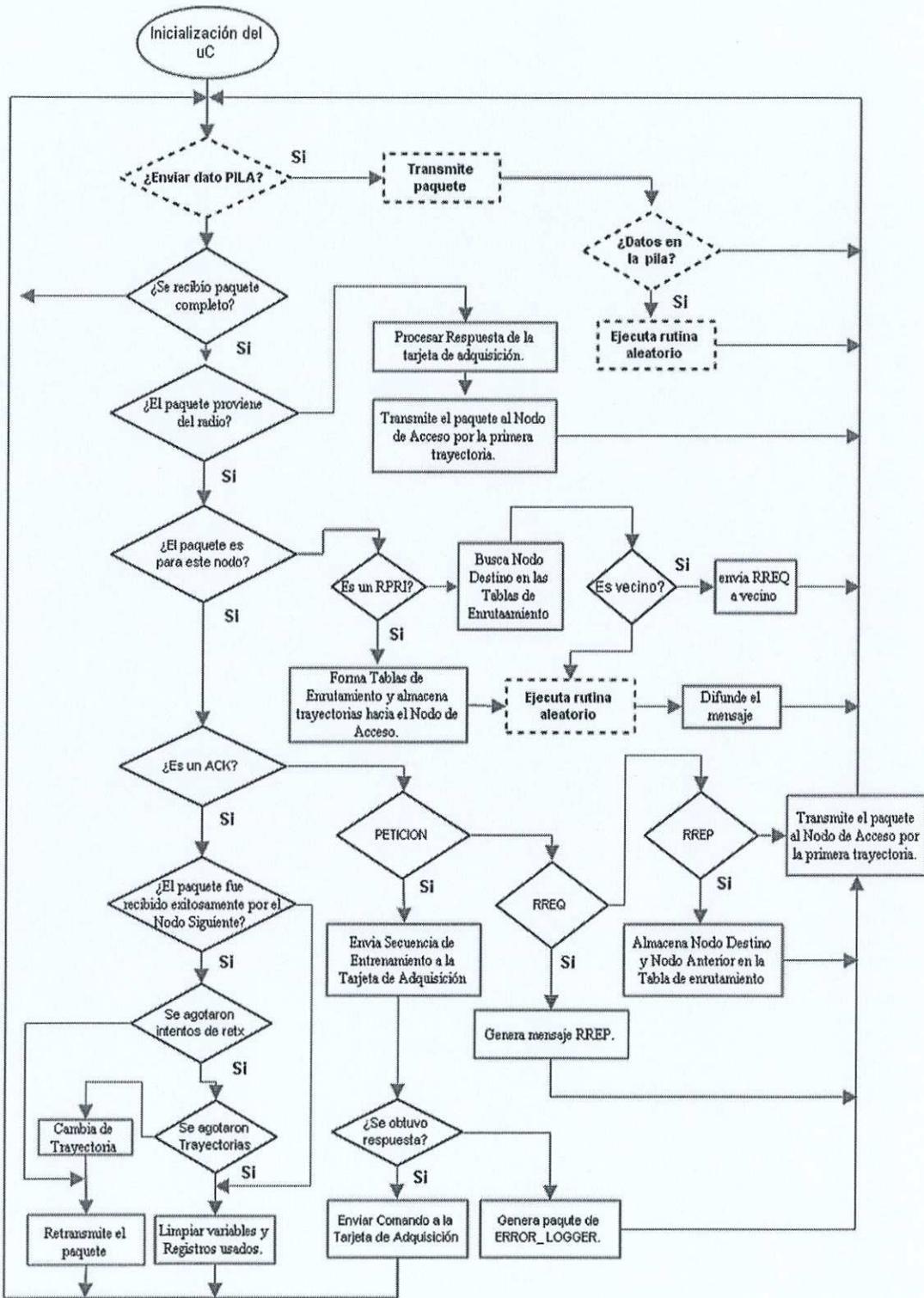


Figura33: Diagrama del funcionamiento generalizado del programa principal del Protocolo de enrutamiento de M a 1.

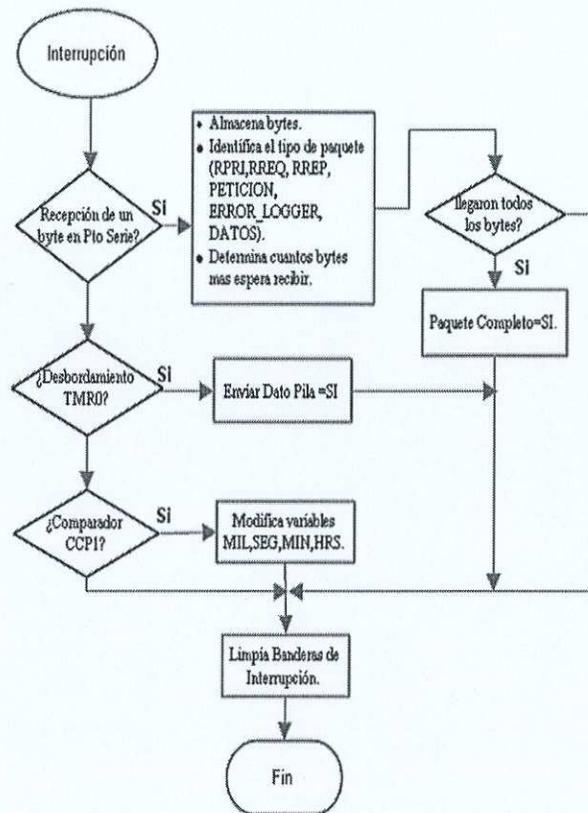


Figura34: Diagrama de flujo de la rutina de atención a la interrupción.

El haber modificado el programa principal, para que funcione en base a mecanismos generadores de interrupciones, ofrece la posibilidad de que el microcontrolador pueda irse a “dormir” para que no gaste más recursos de los necesarios y solo regrese cuando alguna de estas interrupciones se presenten en el *Nodo Sensor*.

V.3. Implementación del protocolo de enrutamiento por trayectorias múltiples hacia múltiples nodos (M a M).

Para poder implementar los mecanismos de las diferentes fases del funcionamiento del protocolo propuesto en esta tesis, se utilizaron más recursos de la tarjeta de comunicación inalámbrica que los utilizados en el protocolo de enrutamiento M a 1. Algunos de los

recursos empleados fueron: las tres APIs de control (Transmit Packet, Receive Packet Send Data Complete) y la lectura-escritura dinámica de parámetros de la EEPROM del radio, dirección MAC y potencia respectivamente.

El diagrama del programa principal es mostrado en la figura 35, en donde se puede observar que las acciones que se realizan dependen de banderas que se activan en alguna de las funciones que forman al programa principal o en la rutina al servicio de la interrupción, por lo que el microcontrolador necesitará estar verificando si se presenta alguna de estas.

El programa principal maneja dos vertientes, en la primera se tienen un conjunto de funciones que serán ejecutadas en una sola ocasión cuando se energiza la interfaz inalámbrica y en la segunda se presentan las funciones que se ejecutarán durante todo el tiempo en que se encuentre energizada la interfaz inalámbrica o hasta que por algún imprevisto se reinicialice, en cuyo caso la primera vertiente será nuevamente ejecutada.

Dentro de las funciones de la primera vertiente se realiza una verificación del funcionamiento de la tarjeta de adquisición de datos, que como se había comentado en capítulos anteriores para esta aplicación es el *Datalogger CR10X* de *Campbell Scientifics*. En esta verificación el microcontrolador envía una secuencia de entrenamiento que no es más que una cadena de 4 caracteres retorno de carro (0x0D). Esta secuencia de entrenamiento le da oportunidad al *CR10X* a que se auto configure a la tasa de transmisión con la que se quiere comunicar el microcontrolador. Cuando la comunicación entre ambos dispositivos se ha dado de manera exitosa, el *CR10X* envía un *prompt* expresado con un “*”, indicando que se encuentra listo para recibir los comandos de comunicación citados en [CR10X Operator’s Manual, 1997].

Así también se realiza una verificación del radio, en donde el microcontrolador obtiene la dirección MAC y la potencia de transmisión del radio. Dichos parámetros se encuentran grabados en la memoria EEPROM del radio. Los mandos utilizados para obtener estos parámetros se muestran en la tabla V, entre los cuales el más utilizado es el de *Configurar*

Potencia ya que el radio realiza un ajuste dinámico de la potencia en la fase de integración a la red.

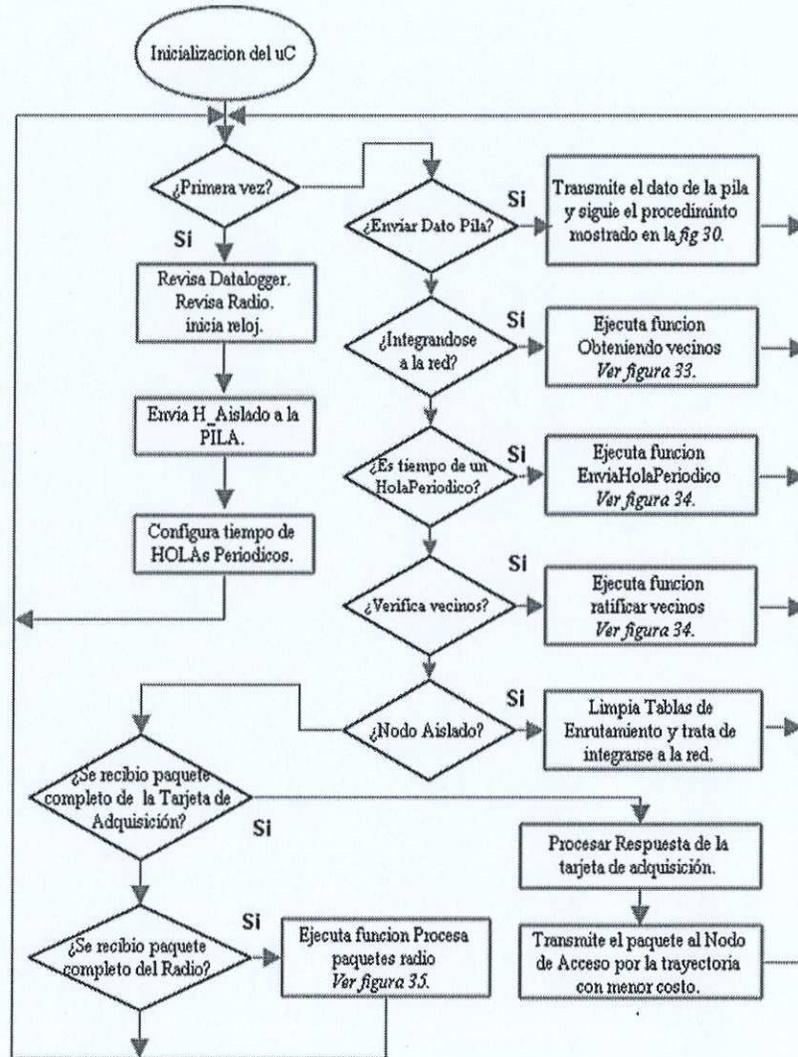


Figura35: Diagrama del funcionamiento generalizado del programa del Protocolo de enrutamiento por trayectorias múltiples a múltiples nodos (M a M).

Una vez que se han obtenido los parámetros del radio, se pone en marcha el RTC, utilizado para determinar el tiempo en que se realizarán las acciones “transmitir mensajes periódicos”, “ratificación de vecinos” e “integración a la red”, mostradas en los diagramas de flujo de las figuras 36 y 37. Este reloj se podría sincronizar en primera instancia con el reloj del CR10X, quedando también la posibilidad de que pueda sincronizarse a distancia

con el reloj del *Nodo de Acceso*. Aunque cabe aclarar que para poder realizar la calibración del tiempo a distancia, deben ser estudiados a profundidad mecanismos de sincronía para poder realizar el cálculo y ajustes de los tiempos cuando el paquete que transporta las variables del reloj viaja a través de múltiples nodos.

Tabla V. Comandos empleados para interactuar con la memoria EEPROM del radio AC4790-1000.

Nombre del Comando	Comando (Hex)				
			Dirección EEPROM	Longitud	Dato a escribir
Leer MAC del Radio (EEPROM)	0xCC	0xC0	0x80	0x06	-
Leer Potencia del Radio (EEPROM)	0xCC	0xC0	0x63	0x01	-
Escribir potencia (EEPROM)	0xCC	0xC1	0x63	0x01	Potencia
Configurar Potencia (RAM)	0xCC	0X25	Potencia		

Para finalizar las acciones de la primera vertiente, se transmite el mensaje para que el nodo se integre a la red, así también se fijan los tiempos en los cuales se volverá a transmitir un mensaje de características similares si no logra integrarse a la red y los que serán enviados periódicamente cuando el nodo se encuentre ya integrado.

Dentro de la segunda vertiente, el microcontrolador realiza acciones que involucran:

- Transmisión de los mensajes que se tienen en la pila FIFO.
- Transmisión de mensajes de integración y de aislamiento a diferentes potencias, generados cuando el nodo no puede “engancharse” a un nodo vecino que se encuentre integrado a la red.
- Verificación del estado de sus vecinos, solo cuando el nodo ya se encuentra integrado a la red.
- Procesamiento de paquetes que provienen del CR10X y de otros nodos en la red.

Una de las funciones mas importantes del protocolo propuesto en esta tesis es la de “procesapaquetesradio”, en donde se involucran las cuatro fases comentadas en el capítulo anterior. El diagrama de flujo de esta función se encuentra en la figura 38 y la rutina que atiende la interrupción en este protocolo se encuentra en figura 34.

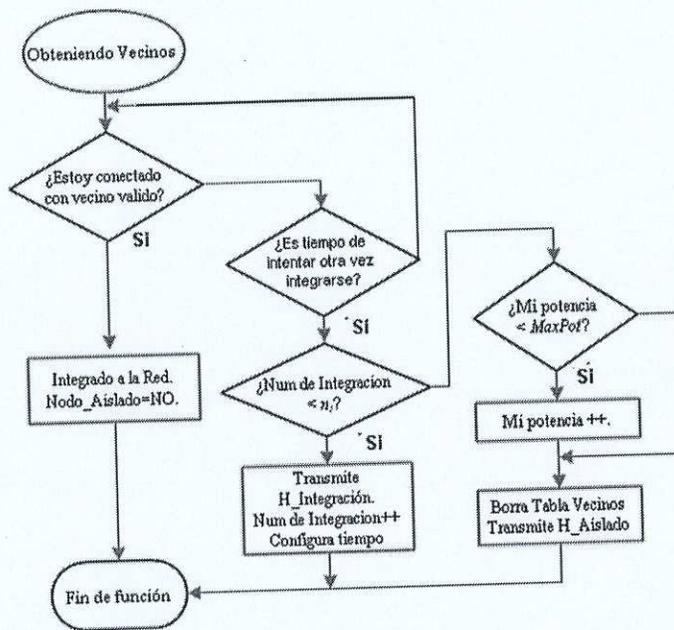


Figura36: Diagrama de la función "Obteniendo Vecinos" del protocolo de enrutamiento M a M.

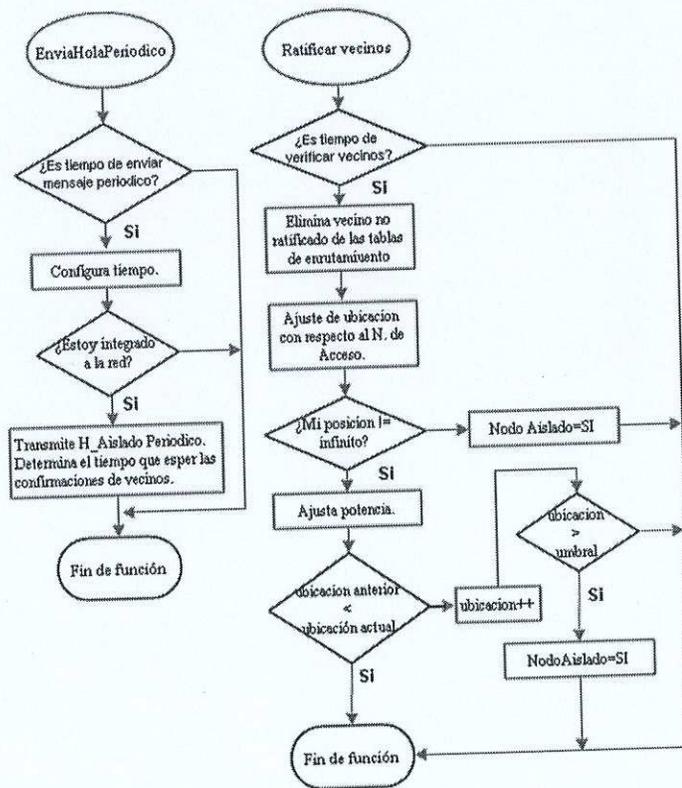


Figura37: Diagrama de la función "EnviaHolaPeriodico" y "RatificarVecinos" del protocolo de enrutamiento M a M.

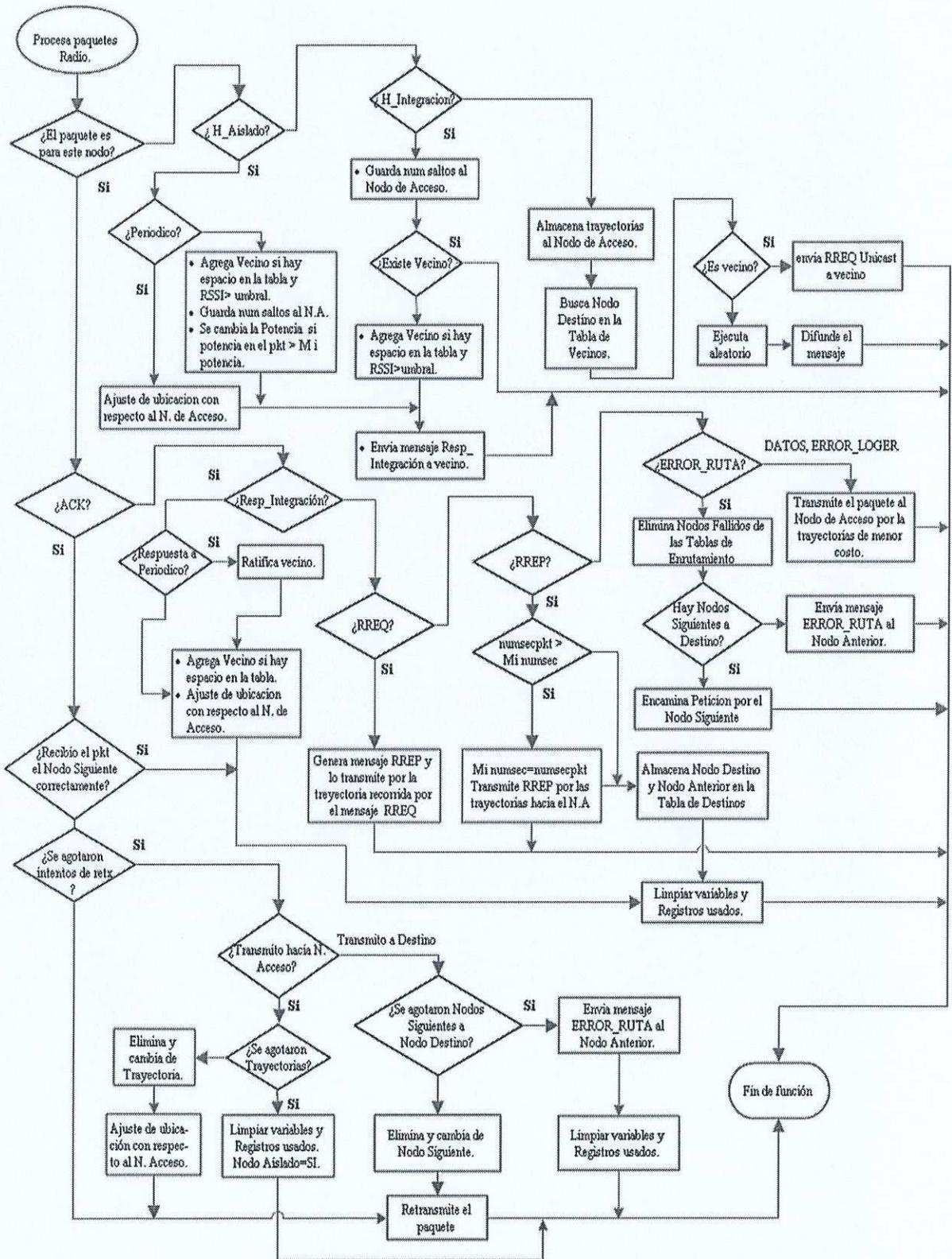


Figura38: Diagrama de la "procesapaquetesradio" del protocolo de enrutamiento M a M

Implementación de la Red Inalámbrica de Sensores de Área Amplia en un ambiente de laboratorio.

La instalación del prototipo de comunicación inalámbrica en el Valle de Mexicali, es una de las partes más importantes de la solución a la problemática presentada en la RDEFVM, por lo que hay que asegurar que dicho sistema funcione correctamente para así obtener el máximo desempeño de la red. Para conseguir esto, es necesario realizar pruebas operativas al sistema completo, adaptándolo de manera tal que las grandes distancias que se tienen en la RDEFVM no sean un impedimento para poder observar el comportamiento del sistema, por lo que en este capítulo se muestran los temas que han sido tomados en cuenta para realizar dicha adaptación. Así también se muestran los resultados que se obtuvieron al realizarle pruebas a la WAWSN con los protocolos de enrutamiento diseñados.

VI.1. Caracterización de las interfaces inalámbricas e instalación en la zona de pruebas.

Las distancias entre nodos de la Red de Sensores de Deformación del Valle de Mexicali, como lo comenta [Cortez Vázquez, 2006] al finalizar su tesis, eran de 4 km en promedio. En la actualidad, debido a un reacomodo de los sensores en el campo de acción (Figura 39), se tienen distancias entre nodos de 8.5km y 6 km.

Es así que para poder implementar la WAWSN en un ambiente de laboratorio, de tal manera que trate de ser una representación a escala de la red que se tiene desplegada en el Valle de Mexicali, se realizaron cálculos y algunas mediciones de campo de enlaces

inalámbricos punto a punto, que proporcionaran información (intensidad de potencia recibida) sobre el comportamiento que tendría la señal transmitida por un *Nodo Sensor* hacia otro al propagarse a estas distancias.



Figura39: Ubicación, identificación y distancia entre nodos en la que será la Red Inalámbrica de Sensores de Deformación del Valle de Mexicali (RISDEFVM)

Para calcular la intensidad de potencia recibida se utilizó la ecuación (4),

$$P_r = P_t - L_{ct} - L_p - L_{cr} \quad (4)$$

donde P_r es la intensidad de potencia captada por el receptor, P_t es la potencia de transmisión de la interfaz inalámbrica, L_{ct} , L_{cr} son las pérdidas en los cables y conectores del transmisor y el receptor respectivamente, L_p son las pérdidas que sufre la señal al propagarse en el medio. Estas pérdidas fueron estimadas empleando dos modelos de propagación determinísticos, el de espacio libre y el de dos rayos.

El modelo de propagación de espacio libre se deduce de las ecuaciones de Maxwell y permite calcular las pérdidas por propagación a determinada distancia en condiciones

donde hay un claro camino de visibilidad directa (Line of Sight -LOS) entre el transmisor y el receptor. La ecuación (5) es empleada para calcular estas pérdidas

$$L_{friss} = -10\log G_t - 10\log G_r - 20\log \lambda + 20\log d + 21.98 \quad (5)$$

donde d es la distancia entre el transmisor y el receptor en metros, G_t y G_r son las ganancias de las antenas del transmisor y receptor respectivamente y λ es la longitud de onda de la frecuencia del sistema dada en metros. Cuando se manejan pérdidas pequeñas y antenas isotrópicas ($G_t=1$ y $G_r=1$), se puede utilizar la ecuación (6),

$$L_{friss} = 20\log f + 20\log d + 32.44 \text{ dB} \quad (6)$$

donde f es la frecuencia en Megahertz y d es la distancia en kilómetros.

El modelo de dos rayos es empleado debido a que por lo regular la propagación de las ondas de radio no llega por un solo trayecto hacia el receptor, sino más bien, lo hacen por diversas trayectorias (trayectoria directa, reflejada en tierra, trayectoria indirecta que consiste en ondas de superficie) en diferentes fases. Por lo que a grandes distancias el modelo de 2 rayos al considerar parámetros como la altura de las antenas del transmisor y el receptor, entrega una mejor predicción que el modelo de espacio libre. La ecuación (7) es empleada para calcular las pérdidas por propagación utilizando el modelo de dos rayos.

$$L_{dosrayos} = -10\log G_t - 10\log G_r - 20\log(h_t h_r) + 40\log d \quad (7)$$

Sin embargo, el modelo de dos rayos no entrega buenos resultados para distancias cortas debido a la oscilación causada por la combinación destructiva y constructiva de los rayos. Por lo que, es necesario calcular una distancia d_c llamada *cross-over* la cual determina

cuando se debe utilizar la ecuación 5 ($d < d_c$), cuando la ecuación 7 ($d > d_c$) y cuando no importa que ecuación utilizar ya que ambas entregan el mismo resultado ($d = d_c$).

$$d_c = \frac{(4\pi h_t h_r)}{\lambda} \quad (8)$$

La intensidad de potencia recibida, calculada con las ecuaciones anteriores a diferentes potencias de transmisión con los parámetros que se tienen en las interfaces inalámbricas construidas (perdidas en los cables-conectores y ganancia de las antenas), se muestra en las figuras 40 y 41.

En ambas figuras se puede observar cual es el mínimo nivel de recepción del radio, el cual difiere al valor reportado por el fabricante (-99dBms), ya que en base a mediciones de campo realizadas, el radio solo reportó un RSSI (Receive Signal Strength Intensity) no menor de -95 dBms.

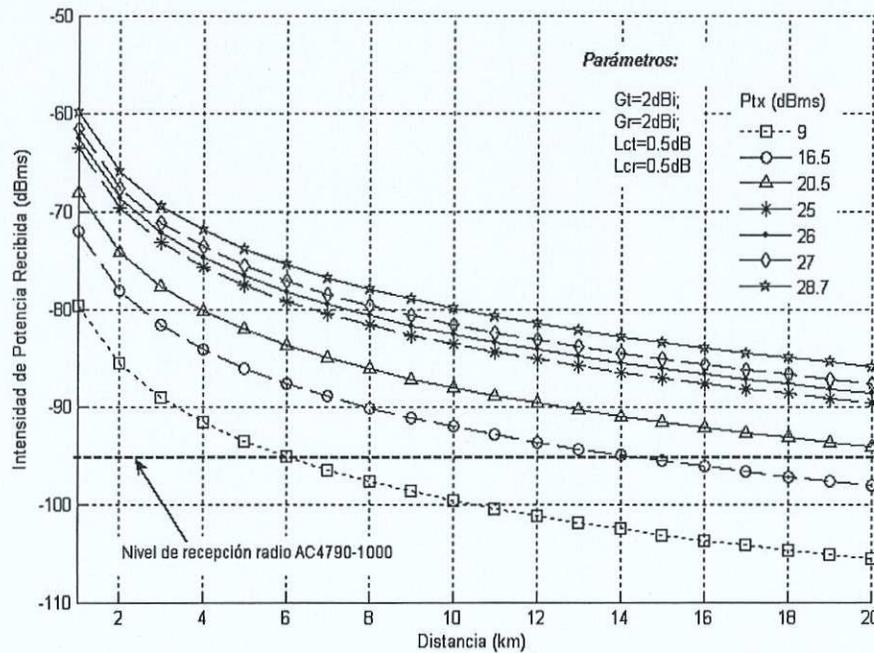


Figura40: Valores teóricos de intensidad de potencia recibida con respecto a la distancia utilizando el modelo de propagación de espacio libre.

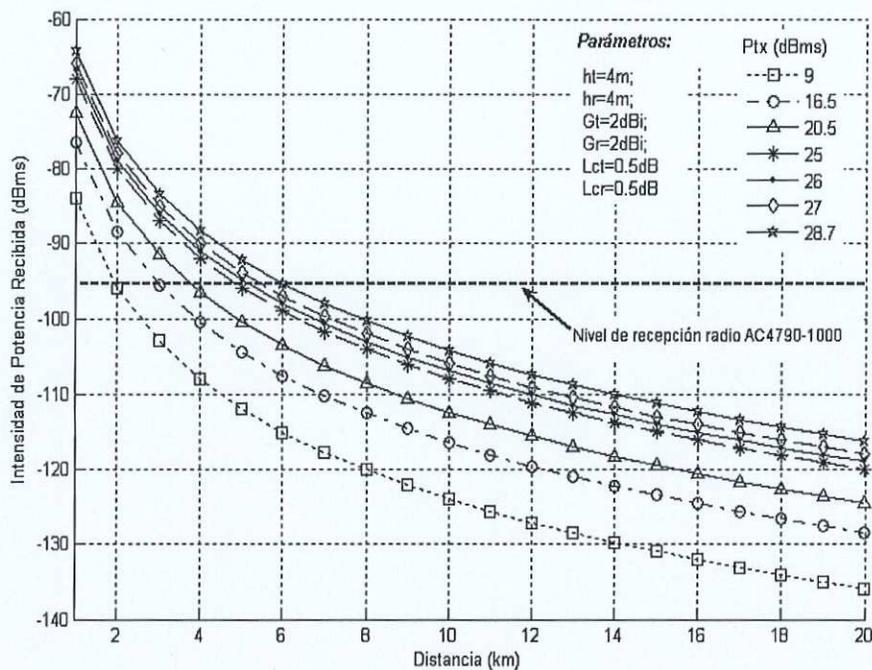


Figura41: Valores teóricos de intensidad de potencia recibida con respecto a la distancia utilizando el modelo de propagación de dos rayos con una altura de las antenas de 4m.

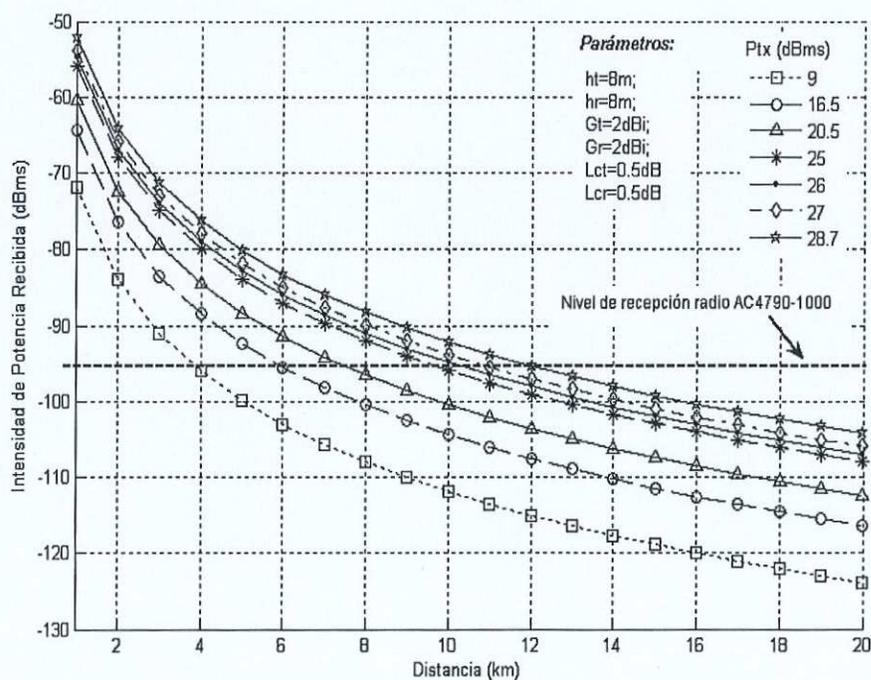


Figura42: Valores teóricos de intensidad de potencia recibida con respecto a la distancia utilizando el modelo de propagación de dos rayos con una altura de las antenas de 8m.

Como se puede observar en las figuras 41 y 42, al utilizar el modelo de propagación de dos rayos existe una pérdida de 12 dB cuando la distancia se incrementa al doble, en contraparte se tiene una ganancia de 6 dB cuando la altura de alguna de las antenas se incrementa al doble.

Al contar con la información anterior, es posible ver de una manera mas clara cuales serian los parámetros que influyen en la propagación (distancia, potencia de transmisión, altura de las antenas) de una señal en un entorno ideal y de tierra plana. Los resultados mostrados en las figuras anteriores están dados para distancias de kilómetros, en una ventana que involucra las distancias máximas entre nodos. Pero como lo que se pretende es implementar la red en dimensiones reducidas ($<20\text{m}$), es necesario que se calculen las pérdidas por propagación en distancias de metros para así conocer cuanto hay que atenuar la señal para tener un comportamiento similar a lo observado cuando las distancias son del orden de kilómetros. El modelo utilizado para estimar las pérdidas por propagación fue el de espacio libre, esto debido a que la distancia máxima con la que se desea trabajar es menor a la distancia de *cross over* ($20\text{m} < 38.08\text{m}$).

Después de realizar una búsqueda de un valor de atenuación que afectara a la ecuación (4) de tal manera que existiera una relación de metros a kilómetros en lo que se refiere a intensidad de potencia recibida, se encontró que si la señal se atenúa un millón de veces (60 dBs) se puede presentar esta situación.

En la figura 43 se muestra la intensidad de potencia recibida en la ventana de 20 metros, en la parte superior se tiene el resultado al emplear la ecuación 4 y en la parte inferior se tiene el resultado cuando se le atenúa 60dBs a la señal. Como se puede observar comparando las figuras 40 y 43 al atenuar la señal se presentan los mismos resultados. Por lo que se puede llegar a decir que bajo condiciones ideales si se atenúa la señal 60 dBs se puede tener una relación en donde 1 m es igual a 1 km, basándonos en la intensidad de potencia recibida calculada.

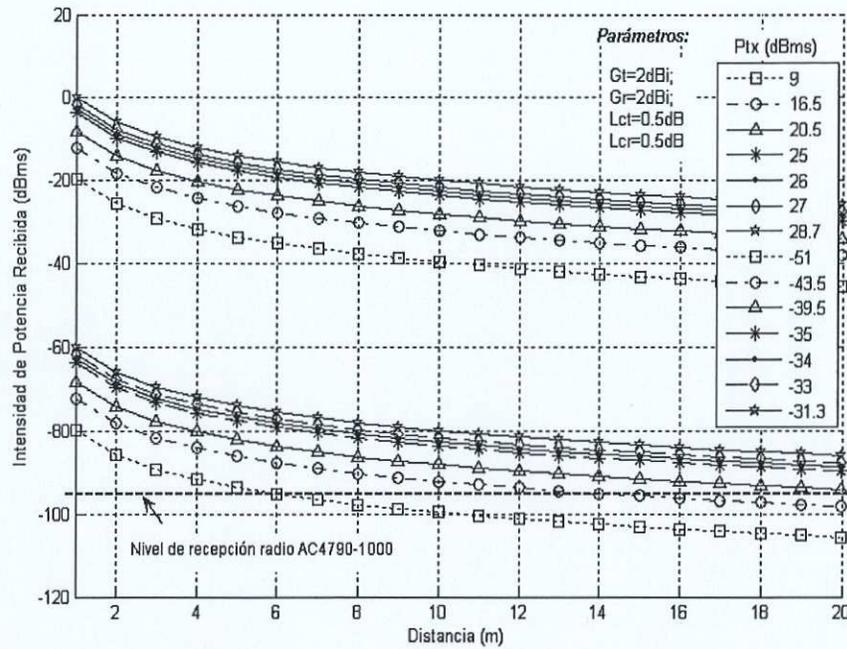


Figura43: Valores teóricos de intensidad de potencia recibida atenuada con respecto a la distancia utilizando el modelo de propagación de espacio libre.

Para comprobar esta situación se realizaron mediciones de la intensidad de potencia recibida con un Analizador de Espectros marca AGILENT modelo E44028 en la azotea de la División de Física Aplicada (DFA) del CICESE (Figura 44), lugar en el que se presentan condiciones de trayectoria de visibilidad directa.

Los parámetros con los que se realizaron las mediciones fueron los siguientes:

Analizador de espectros

- RBW=30Khz.
- SweepTime=250ms.
- ATT=0dB.
- Frecuencia 900-930Mhz.
- Detector de Picos.

Condiciones físicas

- * $h_t, h_r = 0.8\text{m}$
- * $d=1,2,3,4,6,8,10,12,14,16,18\text{ m}$
- * 3 modelos de interfaz inalámbrica con 2 atenuadores de 30 dBs.

En la figura 45 se graficó el promedio de las mediciones tomadas del analizador de espectros en las distancias marcadas, así también se muestra la curva que se ajusta a las

mediciones empleando un modelo exponencial de un solo término (ecuación 9) proporcionado por la herramienta de ajuste de curvas de MATLAB.

$$y = ae^{bx} + c \tag{9}$$

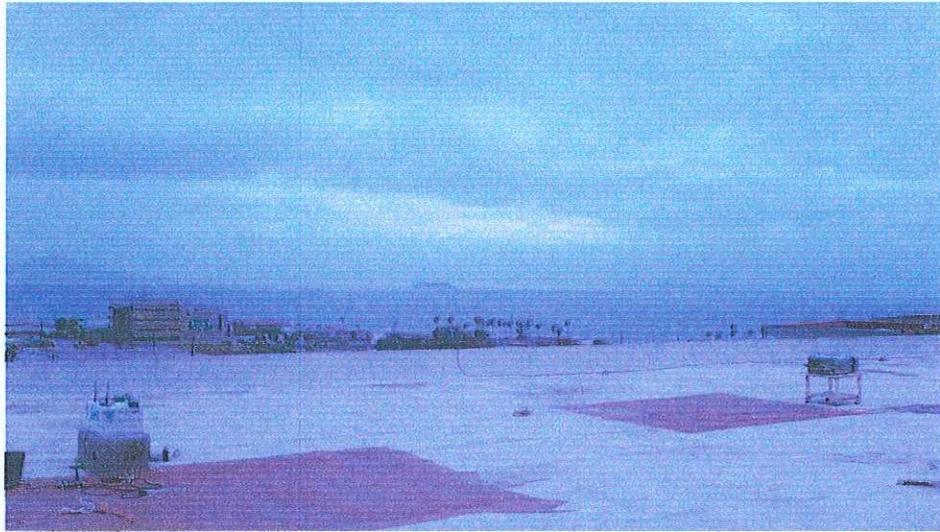


Figura44: Azotea de la División de Física Aplicada del CICESE

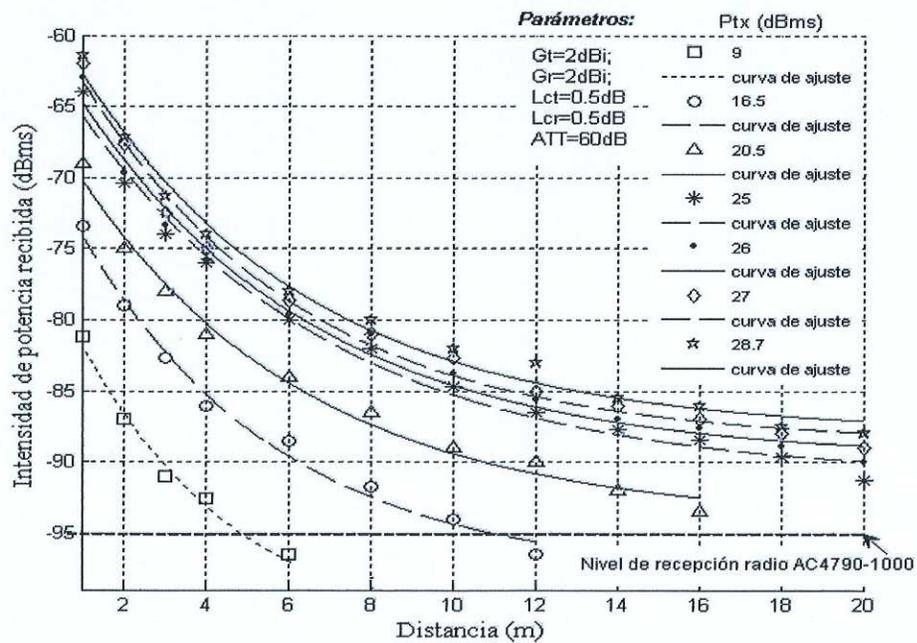


Figura45: Valores de intensidad de potencia recibida medidos con el Analizador de Espectros.

Como se presenta en la Figura 45, no fue posible medir señales por debajo de los -97 dBms, esto debido a la sensibilidad del Analizador de Espectros, por lo que solo se tomaron medidas cercanas al umbral (medido) de recepción del radio. En esta figura también se puede notar que existe en promedio una diferencia de aproximadamente 2dBs de los valores teóricos con los medidos, situación que puede ser causada por diversos factores como:

- condiciones climáticas, ya que los componentes electrónicos se comportan de forma diferente en función de la variación de la temperatura,
- acoplamientos entre el radio, línea de transmisión y la antena, en esta tesis no se midió si existía un acoplamiento adecuado.
- altura de las antenas, etc.

Sin embargo estas mediciones comprueban que con las condiciones que se presentan en la azotea de la DFA existe una relación en donde la intensidad de potencia que se recibe a un metro, utilizando atenuadores, se asemeja al valor de la intensidad de potencia recibida que se espera en un 1 kilómetro en condiciones ideales.

Utilizando una de las APIs de control (*Send Data Complete*) del radio también es posible medir la intensidad de potencia con la cual el radio remoto escucha al radio local (RSSI) y la intensidad de potencia con la cual el radio local escucha al radio remoto (RSSI*). Estos parámetros los entrega la tarjeta de comunicación inalámbrica en formato hexadecimal hacia el microcontrolador, en donde después de realizar una conversión hacia valores expresados en dBms, siguiendo una tabla proporcionada por el fabricante, es posible obtener de manera aproximada la intensidad de potencia con la cual recibe paquetes la tarjeta de comunicación inalámbrica.

Tomando en cuenta la posibilidad de medir la intensidad de potencia recibida con el radio, dió motivos para que se realizaran mediciones de enlaces punto a punto entre dos radios en la misma zona de pruebas, considerando los siguientes parámetros:

las 8 interfaces construidas en un área de 20 x 14 m en la azotea del edificio de la DFA. La ubicación de cada una de estas, se realizó en función de las distancias proporcionadas en la figura 39, realizando el correspondiente ajuste en las distancias. La red implementada en la azotea se muestra en la figura 47 y en la figura 48 se muestran la ubicación de cada interfaz dentro de la zona de pruebas.



Figura47: Red Inalámbrica de Sensores de Deformación del Valle de Mexicali implementada en la azotea de la DFA.

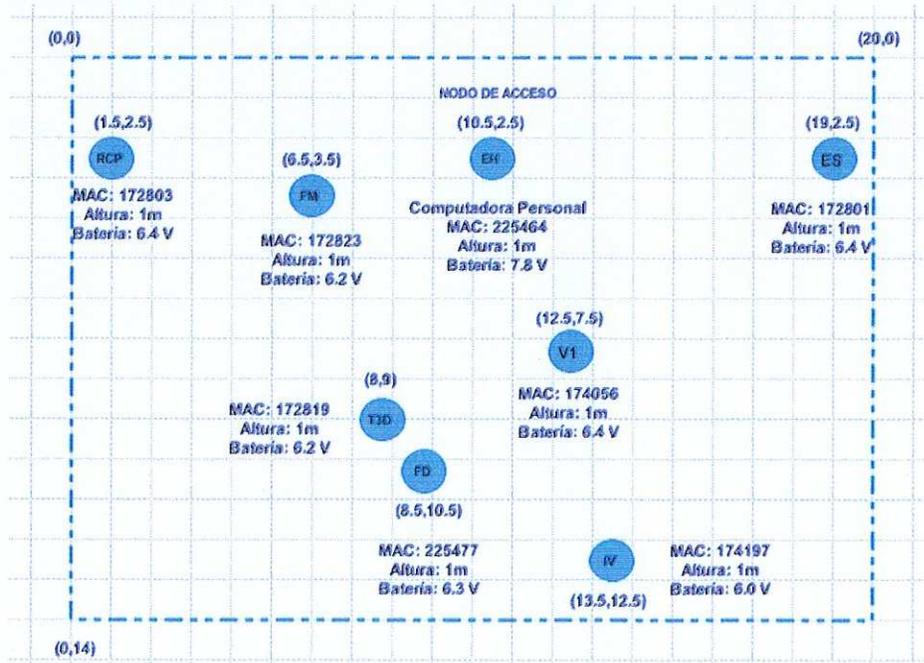


Figura48: Ubicación de las interfaces inalámbricas en la zona de pruebas.

VI.2. Pruebas del funcionamiento del protocolo de enrutamiento por trayectorias múltiples (M a 1) y resultados obtenidos.

Para poder probar el funcionamiento del protocolo de enrutamiento M a 1 en la WAWSN, fue necesario desarrollar lo siguiente:

- Modificar el protocolo de enrutamiento por trayectorias múltiples M a 1.
- Realizar el programa del *Nodo de Acceso* que será alojado en la interfaz inalámbrica.
- Realizar una Interfaz gráfica en una computadora personal para recolectar los datos de la prueba del funcionamiento.
- Programar e implementar en un microcontrolador un sistema que emule el comportamiento de una tarjeta de adquisición de datos CR10X.
- Implementar la red como se comento en la sección anterior.

Las modificaciones hechas al algoritmo de enrutamiento se citan a continuación.

- Cuando se transmite un paquete (DATOS, COMANDOS, ERROR_LOGGER, RREP) cuyo destino final es el *Nodo de Acceso*, el *Nodo Sensor* antes de que lo retransmita, agrega su ID en el paquete y el número de veces que ha retransmitido el mensaje, para que el *Nodo de Acceso* pueda conocer la trayectoria que ha recorrido el paquete y el número total de veces que se ha retransmitido el mensaje antes de llegar al *Nodo de Acceso*.
- Se le agregó la opción de extraer información de las interfaces inalámbricas como tablas de enrutamiento (Padres, Hijos, Hermanos, Primos), trayectorias almacenadas hacia el *Nodo de Acceso*, el número de paquetes de control recibidos, y el tiempo en que fueron recibidos.

El funcionamiento del *Nodo de Acceso* difiere en algunos aspectos de todos los demás nodos, debido a que este es el que proporciona los comandos y los tiempos de recolección de los paquetes.

El programa desarrollado para este nodo se divide en dos partes, y toma en cuenta las recomendaciones proporcionadas por Cortez Vázquez [2006] en el anexo de su tesis en lo que se refiere al funcionamiento que debe seguir. La primera parte es el programa que será implementado en la interfaz inalámbrica, el cual ofrece la posibilidad de comunicarse con una computadora portátil por el puerto USB, para poder recibir y enviar comandos e información recolectada de los nodos sensores respectivamente, el diagrama de flujo del funcionamiento del programa escrito se presenta en la figura 49. La segunda parte comprende una interfaz gráfica desarrollada en Visual Basic 6.0, la cual fue utilizada para enviar los paquetes de control necesarios para recolectar los arreglos de datos del CR10X, de forma manual o automática.

En el modo manual se envían los mandos mediante botones para que la interfaz inalámbrica envíe los paquetes de control (RPRI, RREQ, PETICION) necesarios para formar la red y recolectar los datos del nodo seleccionado en la lista de nodos que forman la red. En el modo automático se debe seleccionar el nodo al que le quiere recolectar la información y se presiona un botón que inicia un procedimiento encargado de obtener los paquetes del nodo utilizando un máximo número de intentos de paquetes de control, esperando el tiempo suficiente entre cada paquete para darle oportunidad a que ocurran las retransmisiones de los paquetes de difusión hechas por cada nodo.

Debido a la falta de tarjetas de adquisición de datos CR10X durante la tesis, ya que solo se contó con una en un corto periodo de tiempo, fue necesario realizar un programa que emulara el comportamiento de estas tarjetas de adquisición, respondiendo a los comandos de recolección enviados por las interfaces inalámbricas en un microcontrolador. Fueron implementados cuatro circuitos en tablillas de prácticas las cuales fueron muy útiles en la fase de pruebas.

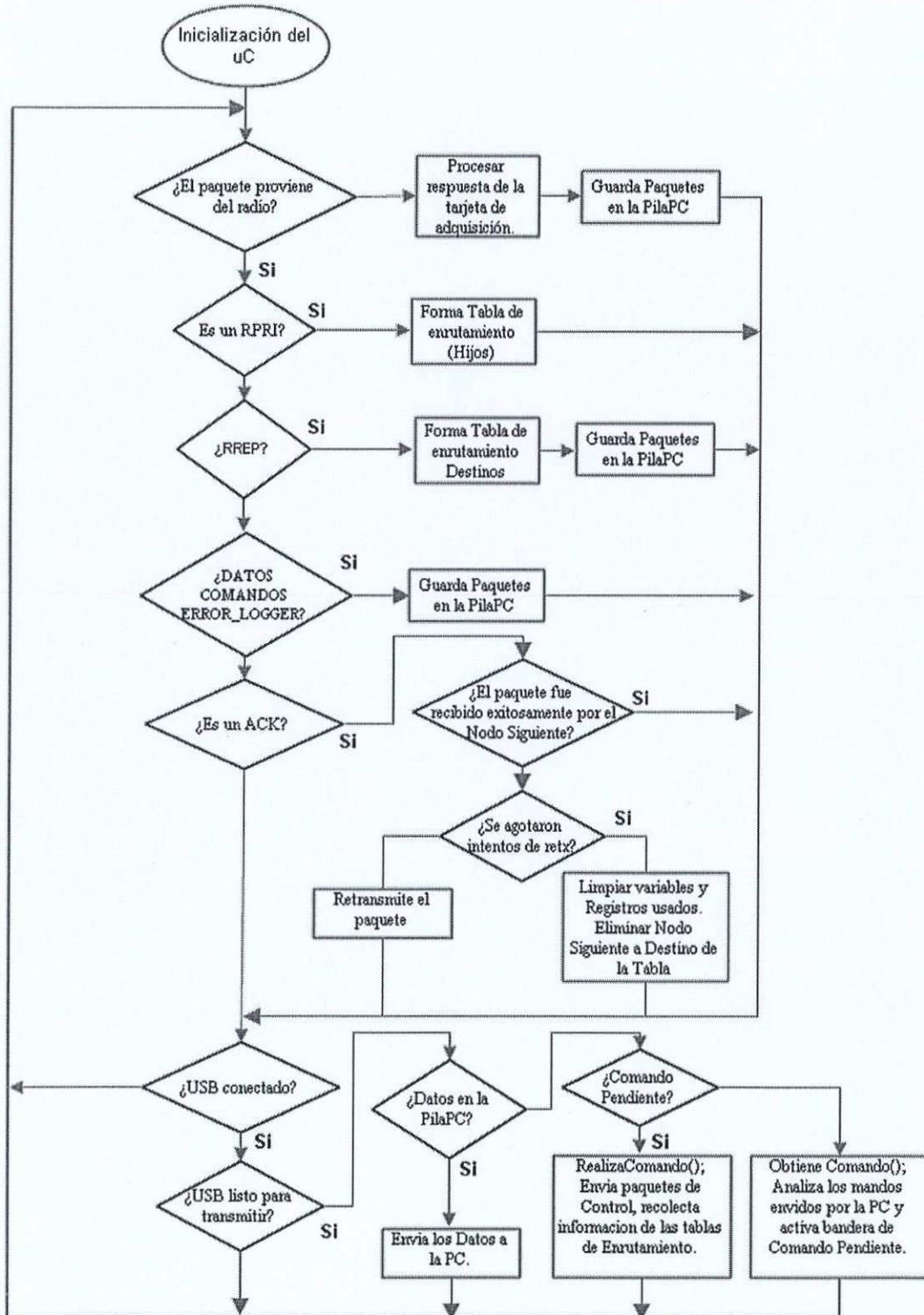


Figura49: Algoritmo implementado en la interfaz inalámbrica del Nodo de Acceso para probar el funcionamiento del protocolo d enrutamiento M a 1.

Para generar los resultados se realizó lo que a continuación se menciona.

Consideraciones:

- Se configuraron todas las tarjetas de comunicación inalámbrica con una misma potencia de transmisión capaz de cubrir las distancias entre nodos. (18.5dBms).
- Se midieron las baterías de cada *Nodo Sensor* comprobando que tuvieran un nivel de voltaje apropiado para no tener problemas en la transmisión de datos.
- A cada interfaz inalámbrica se le agrego un cable y un atenuador de 30 dB entre el radio y la antena.
- Se enviaron mensajes de control RPRI de forma manual con la interfaz gráfica programada para que los nodos sensores formaran las trayectorias primarias hacia el *Nodo de Acceso*.
- Entre cada mensaje RPRI se solicitó una ruta hacia cada uno de los nodos sensores.
- Se enviaron mensajes de PETICION hacia los nodos sensores que contaban con un CR10X.
- Se desconecto un *Nodo Sensor* en la red para emular la perdida de este y se observó el comportamiento del protocolo de enrutamiento.

La red formada en la mayoría de las ocasiones después de difundir el mensaje RPRI se muestra en la figura 50. En esta se pueden observar las trayectorias primarias formadas hacia el *Nodo de Acceso* con líneas continuas, identificando cada rama del árbol con colores diferentes, y las trayectorias alternas identificadas con líneas punteadas. También se observa que el *Nodo de Acceso* alcanzo a dar cobertura a gran parte de los nodos en la red, esto es atribuible a la potencia de transmisión utilizada y las condiciones ideales del entorno.

Puede notarse que el único *Nodo Sensor* que formó dos trayectorias (*EH-FD;EH-V1*) de regreso hacia el *Nodo de Acceso* es el nodo *IV*, las cuales estuvieron oscilando entre las trayectorias *EH-T3D;EH-V1*, *EH-T3D;EH-V1* e inclusive las tres (*EH-T3D;EH-V1*, *EH-*

FD), pero todo esto dependió del retardo pseudoaleatorio generado para enviar el mensaje de difusión que forma el árbol.

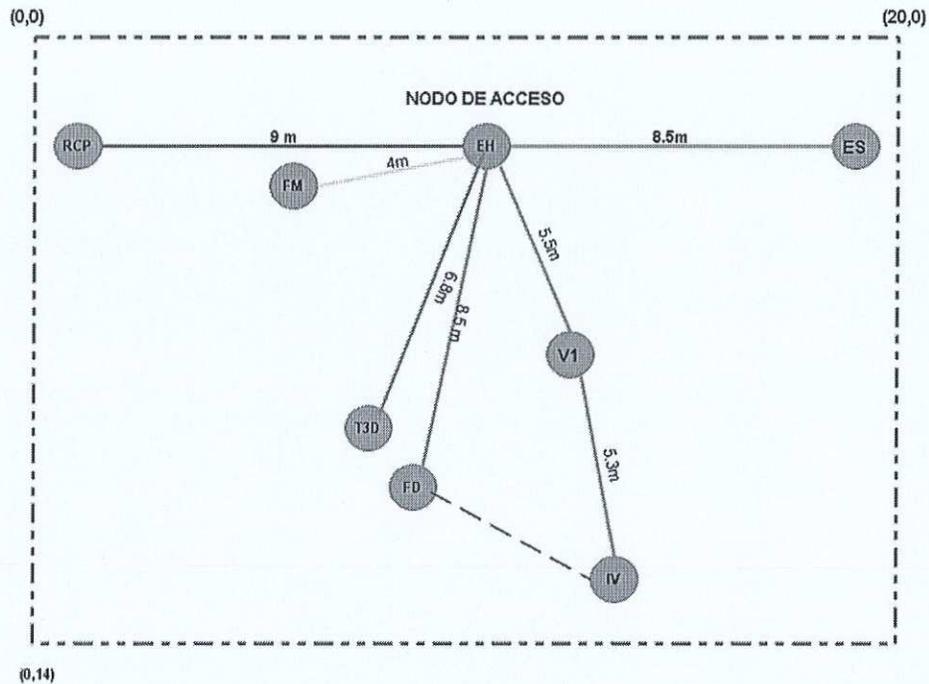


Figura50. : Trayectorias formadas por el protocolo de enrutamiento *M a 1* después de difundir el mensaje *RPRI*.

La tabla VI es un concentrado de la información generada por cada una de las interfaces inalámbricas después de realizarse la primera fase del protocolo. En esta se puede observar con mas claridad cual el fue el área de cobertura real que tuvo cada *Nodo Sensor*, así como las trayectorias que se formaron y que se presentaron en la figura 50.

Al iniciar la segunda fase con la solicitud de ruta (*RREQ*) a cada uno de los nodos sensores que integran la red, los nodos sensores no tuvieron problemas en transmitir un mensaje de respuesta a la solicitud de ruta (*RREP*), haciéndolo por las trayectorias primarias, como se puede observar en la figura 51, en donde se muestra el archivo generado por el *Nodo de Acceso* al recolectar los mensajes de respuesta con un visor de datos en hexadecimal.

Tabla VI. Tablas de Nodos Vecinos formadas por los nodos sensores en la prueba del funcionamiento del protocolo de enrutamiento M a I.

Nodo de Acceso (225464)					
<i>Padre</i>	<i>Hijos</i>	<i>Hermanos</i>	<i>Primos</i>	<i>Primera Trayectoria</i>	<i>Alternas</i>
--	RCP,FM,T3D,FD,V1,ES	--	--	--	--
Nodo RCP (172803)					
EH	--	--	FM	EH	--
Nodo FM (172823)					
EH	--	--	RCP,T3D,FD	EH	--
Nodo T3D (172819)					
EH	--	--	FM,V1,FD	EH	--
Nodo FD (225477)					
EH	--	--	V1,IV,T3D,FM	EH	
Nodo V1 (174056)					
EH	IV	--	FD,IV,T3D,ES	EH	--
Nodo IV (174197)					
V1	--	--	FD,T3D	EH-V1	EH-FD
Nodo ES (172801)					
EH	--	--	V1	EH	--

Tabla VII. Tablas de Destinos formadas por los nodos sensores en la prueba del funcionamiento del protocolo de enrutamiento M a I.

Nodo de Acceso		Nodo V1 (174056)	
Nodo Destino	Nodo Siguiete	Nodo Destino	Nodo Siguiete
FM-172823	FM-172823	IV-174197	IV-174197
RCP-172803	RCP-172803		
ES-172801	ES-172801	Nodos ES,FM,RCP,T3D,FD,IV	
T3D-172819	T3D-172819	--	--
FD-225477	FD-225477	--	--
IV-174197	V1-174056-	--	--
V1-174056	V1-174056	--	--

Durante el proceso de recolección de los paquetes del nodo *IV*, el nodo *VI* fue apagado después de que transmitiera el mensaje de PETICION, emulando la pérdida del nodo. Al realizar esta acción, el nodo *IV* trató de transmitir el paquete de DATOS por la primera trayectoria almacenada, pero al no obtener un ACK exitoso del nodo *VI*, después de varias retransmisiones, direccionó el paquete por la ruta alterna hacia el *Nodo de Acceso*. En la figura 52 se puede observar el recorrido del paquete de Datos, así como el número de arreglo recolectado hasta el momento.

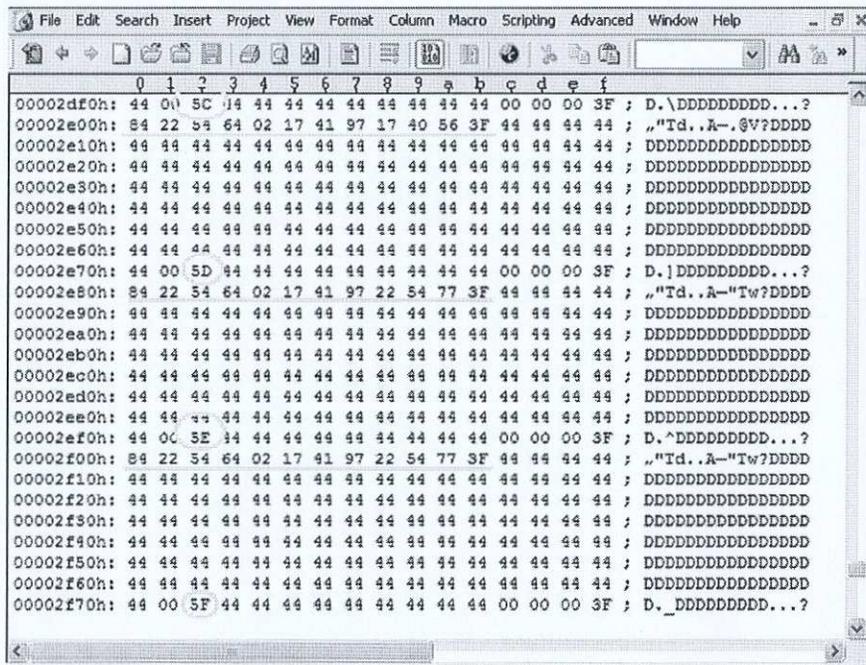


Figura52. : Paquetes de DATOS recolectados por el Nodo de Acceso en la prueba del funcionamiento del protocolo de enrutamiento M a 1.

El tiempo que tarda en llegar un paquete hacia el *Nodo de Acceso* cuando un *Nodo Sensor* cambia de trayectoria es variable y depende de varios factores (densidad de la red, tráfico, número de retransmisiones, etc), pero basándose en la información recolectada de la red, se encontró que este tiempo dependió en demasía del número de retransmisiones utilizadas para cada paquete y del modo de funcionamiento de la tarjeta de comunicación inalámbrica. En esta prueba, al tener configurada la tarjeta de comunicación inalámbrica en modo Full

Dúplex, con un tiempo de Backoff de 50 ms, con el máximo número de retransmisiones por paquete (255), el paquete de DATOS tardó en llegar aproximadamente 27 segundos.

Al llegar al *Nodo de Acceso* el paquete de DATOS, este nodo intentó transmitirle un mensaje de PETICION de recolección de paquetes del nodo *IV* al nodo *VI*, pero al no tener éxito después de agotar el número de retransmisiones configuradas, optó por volver a difundir un mensaje RREQ. En esta ocasión el mensaje RREP arribó al *Nodo de Acceso* por la trayectoria *IV-FD*. Por lo que el Nodo *EH* agregó al nodo *FD* como Nodo Siguiente hacia el nodo *IV* en su Tabla de Destinos.

El tiempo que tuvo que esperar el *Nodo de Acceso* para recibir el mensaje RREP fue mayor a 25 segundos, observándose que el nodo *IV* intentó transmitir el mensaje de respuesta por la primera trayectoria antes de cambiar hacia la ruta vigente. Al notar esta situación se optó porque el *Nodo de Acceso* realizara una nueva difusión del mensaje de configuración de red RPRI sin el nodo *VI* conectado. La red formada se muestra en la figura 53, en donde se puede observar que el nodo *IV* tiene nuevamente dos trayectorias de regreso a la estación base.

Después de haber configurado la red se solicitó una ruta hacia el nodo *IV* difundiendo un mensaje RREQ, llegando la respuesta por el nodo *FD* en un tiempo mucho menor que el anterior mensaje RREP. Se enviaron mensajes de PETICION por la nueva ruta y se siguieron recolectando los paquetes del *Nodo Sensor*.

Cuando se terminó de recolectar la información se conectó nuevamente el nodo *VI*, pero dado que en el funcionamiento del protocolo no se emplean mensajes de integración a la red, fue necesario que el *Nodo de Acceso* transmitiera un nuevo mensaje de configuración de red para que el nodo *VI* se integrase a la red, consiguiéndolo sin ningún problema.

Algo que se debe de considerar al utilizar este protocolo en la RDEFVM es que si en lugar de que el nodo fallido *IV* fuera el nodo *FM*, este protocolo no ofrecería la posibilidad de

que el *Nodo de Acceso* pueda comunicarse con el nodo *RCP* utilizando la potencia de transmisión programada en su tarjeta de comunicación inalámbrica. Una alternativa sencilla para resolver esta problemática sería dejar programada una potencia de transmisión elevada tanto en el *Nodo de Acceso* como en el nodo *RCP* para que pudiera establecer comunicación, lo cual no sería muy conveniente en lo que respecta al consumo de los recursos energéticos del nodo. Esta situación también se puede presentar en otros nodos de la red, y es causada por el número reducido de nodos con los que cuenta la red.

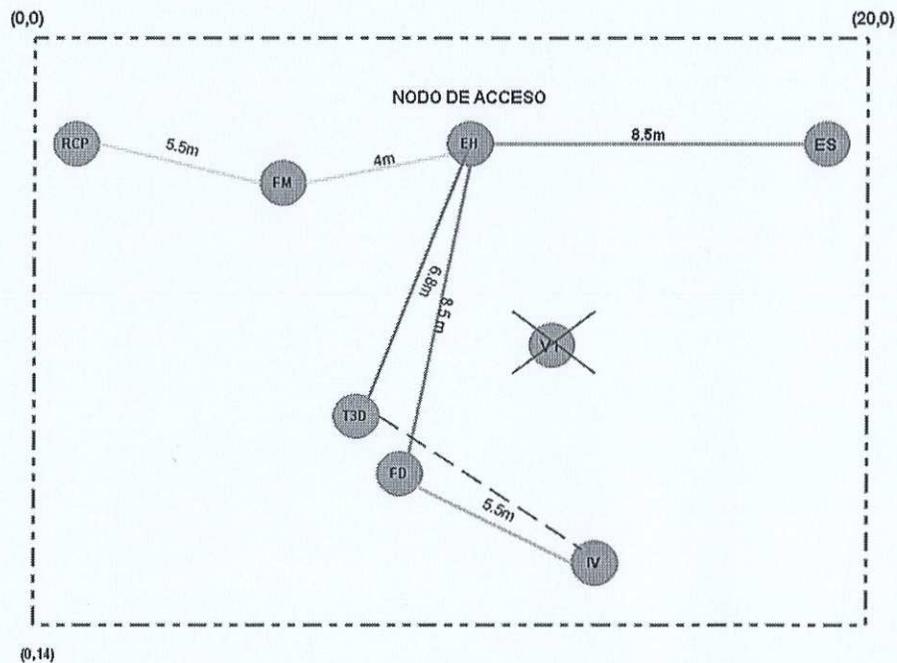


Figura53. : Trayectorias formadas después de difundir un mensaje RPRI en el protocolo de enrutamiento M a 1 con el Nodo Sensor VI desconectado.

Como se pudo observar en estas pruebas de funcionamiento, el protocolo pudo responder sin ningún problema a los cambios que se presentaron en la topología de la WAWSN, así también se pudo identificar una de las posibles mejoras que se le pueden realizar al funcionamiento del protocolo. Esta mejora tiene que ver con agregar un mecanismo que automáticamente realice un ajuste en las trayectorias hacia el *Nodo de Acceso*, eliminando aquellas que ya no sean validas, para así no perder tiempo en el enrutamiento de paquetes y no esperar a que el *Nodo de Acceso* vuelva a difundir un mensaje de configuración de red.

VI.3. Pruebas del funcionamiento del protocolo de enrutamiento por trayectorias múltiples (M a M) y resultados obtenidos.

Para probar el funcionamiento del protocolo de enrutamiento (M a M) con la topología de la RDEFVM, fue necesario desarrollar lo siguiente:

- Realizar el programa del *Nodo de Acceso* que será alojado en la interfaz inalámbrica.
- Realizar una Interfaz gráfica en una computadora personal para recolectar los datos de la prueba del funcionamiento.
- Programar e implementar en un microcontrolador un sistema que emule el comportamiento de una tarjeta de adquisición de datos CR10X.
- Configurar parámetros del radio AC4790-1000 de manera que se ajuste a los requerimientos del funcionamiento del protocolo diseñado.
- Implementar la red en un ambiente con condiciones ideales.

El programa del *Nodo de Acceso* que se encuentra alojado en la interfaz inalámbrica se divide en dos secciones, la primera de ellas ejecuta las mismas acciones que un *Nodo Sensor* en la red (envía mensajes periódicos, realiza una búsqueda de sus Nodos Vecinos, auto configura su potencia, obtiene su MAC ID, etc) y la segunda recibe los mandos por parte de la interfaz gráfica para empezar la búsqueda de un *Nodo Destino* y la recolección de los datos.

Con lo que respecta a la configuración de los parámetros del radio, se utilizaron las 3 APIs de control (*Transmit Packet*, *Receive Packet*, *Send Data Complete*), control de flujo entre microcontrolador y tarjeta de comunicación inalámbrica (RTS Enabled), modo de funcionamiento Full Dúplex, una retracción (Backoff) de 50 ms, ajuste automático de la potencia de transmisión y un esquema de extensión de la sesión entre un par de radios

proporcionado por los paquetes entregados exitosamente y el número de retransmisiones (Slock0=OFF, Slock1=ON).

Las acciones realizadas para la obtención de los resultados de la prueba del funcionamiento del protocolo M a M fueron las siguientes:

- Se configuraron todas las tarjetas de comunicación inalámbrica con la misma potencia de transmisión (18.5 dBms).
- Se configuró el tiempo de los mensajes periódicos en 5 min, el tiempo entre mensajes de integración en 1 min con 2 intentos por cada potencia de transmisión.
- Se manejó un Umbral de Recepción de -92dBms
- Se midieron las baterías de cada *Nodo Sensor* comprobando que tuvieran un nivel de voltaje (>6V) apropiado para no tener problemas en la transmisión de paquetes.
- A cada interfaz inalámbrica se le agregó un cable y un atenuador de 30 dB entre el radio y la antena.
- Se observó el comportamiento del protocolo en la primera fase (tiempos de integración, potencia de transmisión final de cada nodo).
- Se solicitó una ruta hacia los nodos sensores de la red.
- Se enviaron mensajes de PETICION para recolectar paquetes de los nodos sensores que contaban con un CR10X en un microcontrolador.
- Se desconectó y se conectó después de un lapso de tiempo un *Nodo Sensor* y se observó el comportamiento de la red

La red se fue formando conforme se iban transmitiendo los mensajes de control por parte de la interfaz inalámbrica energizada. En la figura 54 se observan con líneas continuas los enlaces inalámbricos bidireccionales formados por cada nodo así como el número de mensajes de control que fueron empleados y el tiempo que le llevó a cada nodo integrarse a la red. Dicho tiempo fue medido con el cronometro programado en la interfaz inalámbrica, siendo aquel que transcurre desde que se energiza la interfaz inalámbrica hasta que obtiene una conexión con un *Nodo Sensor* que cuenta con un costo válido ($cst \neq \infty$) hacia el *Nodo*

de Acceso y que puede mantener un enlace inalámbrico aceptable ($RSSI < \text{Umbral de Recepción}$).

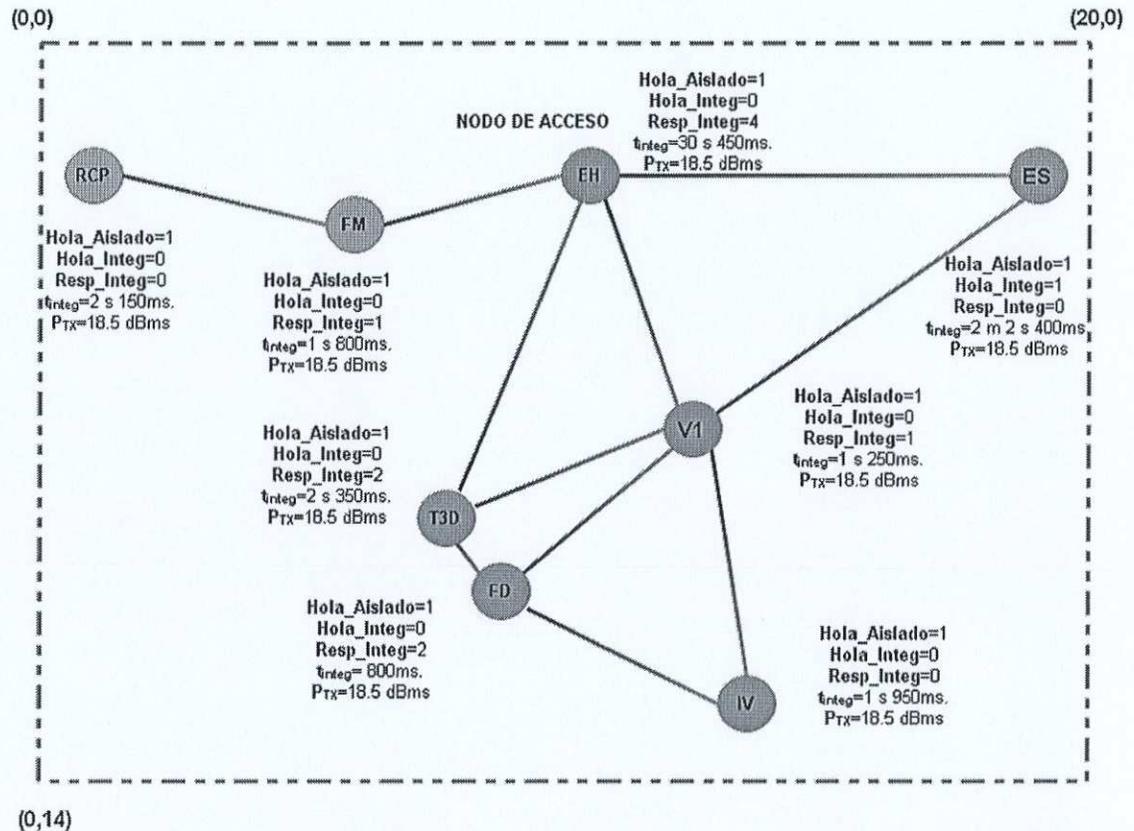


Figura54. : Enlaces inalámbricos entre los nodos de la RISDEFVM al término de la primera fase del protocolo de enrutamiento M a M.

El primer nodo en energizarse fue el *Nodo de Acceso (EH)*, el cual después de un retardo pseudoaleatorio, transmitió un mensaje para conectarse con los nodos dentro de su área de cobertura. El nodo *EH* no obtuvo respuesta inmediata a su solicitud de conexión, sino hasta que el nodo *FM* fue energizado y le transmitió su mensaje de integración, el cual después de que el nodo *EH* procesó el mensaje, le respondió al nodo *FM* con un mensaje de respuesta a la integración, finalizando ambos nodos su proceso de búsqueda de vecinos.

El orden en que se fueron energizando las interfaces inalámbricas fue el siguiente: *FM, RCP, ES, T3D, FD, V1, IV* y el proceso en que se fueron integrando a la red fue muy similar al descrito anteriormente.

La lista de Vecinos recolectada de cada interfaz inalámbrica después de ejecutarse la primera fase del protocolo se presenta en la Tabla VIII. En esta se muestra información sobre la distancia que tienen los Nodos Vecinos hacia el *Nodo de Acceso* expresada en número de saltos(cst), estado de las Tarjetas de Adquisición de Datos (TA), si existe una Alerta en el *Nodo Vecino* originada por algún evento externo, la intensidad de potencia con la que se reciben los paquetes y la mas reciente configuración de potencia de transmisión que posee el *Nodo Vecino*, así también un campo utilizado para identificar las rutas de regreso al *Nodo de Acceso* formadas al procesar el mensaje RREQ.

Tabla VIII. Tablas de Nodos Vecinos formadas por los nodos sensores en la prueba del funcionamiento del protocolo de enrutamiento M a M.

Nodo de Acceso								Nodo T3D							
N. Vecino	cst	TA	Bat	RSSI	RSSI*	Ptx	ID_Ruta	N. Vecino	cst	TA	Bat	RSSI	RSSI*	Ptx	ID_Ruta
FM	-	B	-	-83	-85	18.5	-	EH	1	M	-	-88	-86	18.5	2
T3D	-	B	-	-86	-88	18.5	-	FD	2	B	-	-74	-73	18.5	-
ES	-	M	-	-91	-89	18.5	-	V1	2	M	-	-84	-84	18.5	-
V1	-	M	-	-87	-86	18.5	-								
Nodo FM								Nodo FD							
EH	1	M	-	-85	-83	18.5	-	T3D	2	M	-	-73	-74	18.5	2
RCP	3	M	-	-85	-86	18.5	-	V1	2	M	-	-84	-85	18.5	-
Nodo RCP								IV							
FM	2	B	-	-86	-85	18.5	-								
Nodo ES								Nodo V1							
EH	1	M	-	-89	-91	18.5	-	FD	3	B	-	-85	-84	18.5	-
V1	2	M	-	-90	--89	18.5	-	T3D	2	M	-	-84	-84	18.5	-
Nodo IV								EH							
V1	2	M	-	-86	-85	18.5	1	ES	2	M	-	-89	-90	18.5	-
FD	3	B	-	-85	-85	18.5	2	IV	3	B	-	-85	-.86	18.5	-

RSSI=intensidad de potencia con la cual el radio remoto escucha al radio local

RSSI*= intensidad de potencia con la cual el radio local escucha al radio remoto

En la segunda fase del protocolo se transmitieron mensajes RREQ para solicitar ruta hacia dos nodos sensores, *IV* y *RCP*. Se empezó enviando el mensaje de solicitud de ruta hacia el nodo *IV*, los paquetes de respuesta que arribaron al *Nodo de Acceso* se muestran en la figura 55.

```

File Edit Search Insert Project View Format Column Macro Scripting Advanced Window Help
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 a b c d e f
00000000h: 82 FF FF 01 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 ; ,yy.....
00000010h: 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 ; .....
00000020h: 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 ; .....
00000030h: 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 81 2D FF A6 ; .....-y!
00000040h: 17 40 56 87 22 54 64 02 01 17 41 97 17 40 56 00 ; .@V+"Td...A-.@V.
00000050h: 00 04 17 41 97 17 40 56 3F 00 00 00 00 00 00 00 ; ...A-.@V?.....
00000060h: 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 ; .....
00000070h: 00 00 00 00 00 00 00 00 00 81 2D FF A7 17 28 19 87 ; .....-yS.(.#
00000080h: 22 54 64 03 01 17 41 97 17 28 19 00 00 04 17 41 ; "Td...A-.(...A
00000090h: 97 22 54 77 17 28 19 3F 00 00 00 00 00 00 00 00 ; -"Tw.(.?.....
000000a0h: 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 ; .....
000000b0h: 00 00 00 00 82 FF FF 01 00 00 00 00 00 00 00 00 ; .....,yy.....
000000c0h: 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 ; .....
000000d0h: 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 ; .....
000000e0h: 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 ; .....
000000f0h: 81 2D FF 88 17 28 23 87 22 54 64 02 01 17 28 03 ; .....PTX
00000100h: 17 28 23 00 00 04 17 28 03 17 28 23 3F 00 00 00 ; .....RSSI
00000110h: 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 ; .....
00000120h: 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 82 FF FF 01 ; .....Trayectoria recorrida
00000130h: 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 ; .....

```

Figura 55. : Mensajes RREP recibidos en el Nodo de Acceso después de llevarse a cabo la difusión del mensaje RREQ con el protocolo de enrutamiento M a M.

Como se puede notar en la figura 56, con un solo mensaje RREQ los nodos sensores forman las múltiples trayectorias de regreso hacia el *Nodo de Acceso* y a la vez con el mensaje RREP retransmitido por los nodos sensores que forman estas trayectorias, se obtienen múltiples *Nodos Siguietes* hacia el *Nodo Destino* que generó el mensaje. Tanto el *Nodo de Acceso* como los nodos sensores que forman las múltiples trayectorias hacia el destino agregan a los nodos que han procesado y retransmitido el mensaje de respuesta RREP, ofreciendo la posibilidad de que la estación base pueda enrutar paquetes a más de un destino. Esto se comprueba con las Tablas de Destinos que han sido recolectadas de las interfaces inalámbricas al finalizar la tercera fase, las cuales se muestran en la tabla IX.

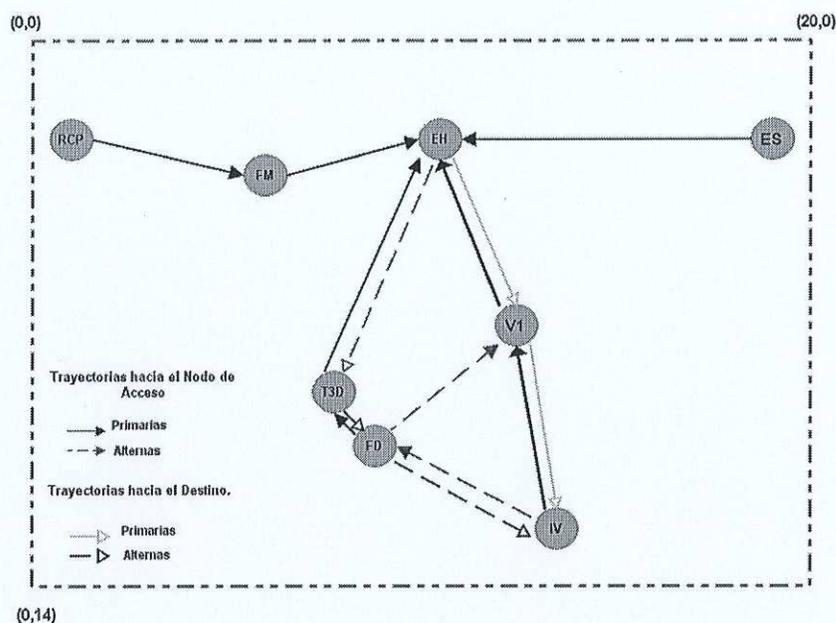


Figura56. : Trayectorias formadas al solicitar una ruta hacia el Nodo Sensor IV utilizando el protocolo de enrutamiento M a M.

La lista de destinos es utilizada por los nodos sensores en la red para enrutar paquetes provenientes del *Nodo de Acceso* hacia los nodos que van a ser ordeñados. Esta tabla contiene el costo que tendría seleccionar alguno de los *Nodos Siguietes* hacia un destino en particular, así también un campo dentro de la tabla que sirve para determinar cual será el *Nodo Siguiete* seleccionado por defecto, esto es, el *Nodo Sensor* siempre encaminará los paquetes del *Nodo de Acceso* por el *Nodo Siguiete* que tenga un menor costo hacia el *Nodo Destino* demandado.

Tabla IX. Tablas de Destinos formadas por los nodos sensores en la prueba del funcionamiento del protocolo de enrutamiento M a M.

Nodo de Acceso				Nodo V1			
Nodo Destino	Nodo Siguiete	cost	Default	Nodo Destino	Nodo Siguiete	cost	Default
IV(174197)	V1(174056)	2	*	IV(174197)	IV(174197)	1	*
	T3D(172819)	3		Nodo T3D			
V1(174056)	V1(174056)	1	*	IV(174197)	FD(225477)	2	*
T3D(172819)	T3D(172819)	1	*	FD(225477)	FD(225477)	1	*
FD(225477)	T3D(172819)	2	*	Nodo FD			
				IV(174197)	IV(174197)	1	*

En el momento en que el *Nodo de Acceso* transmitió un mensaje de PETICION de paquetes hacia el nodo *IV*, la ruta utilizada para tal fin fue la *EH-VI-IV*, siendo esta la de menor costo hacia el Nodo Destino. Los paquetes de DATOS fueron recibidos exitosamente en el *Nodo de Acceso* empleando un esquema de una PETICION por un arreglo de datos del PICCR10X. Podría manejarse un esquema de una PETICION por 10 paquetes de DATOS, reduciendo con esto el consumo de energía en la recolección de los paquetes. Pero no se implementó en el protocolo propuesto debido a la carencia de memoria de datos del segundo modelo de interfaz inalámbrica.

El tiempo promedio que le llevó al *Nodo de Acceso* recolectar un Arreglo de datos del Nodo *IV* fue de 1.32 segundos, tiempo similar al que se obtuvo en la prueba de funcionamiento del protocolo anterior.

En el proceso de recolección de paquetes, se emuló la pérdida del nodo *VI* apagándolo después de que transmitiera el mensaje de PETICION hacia el nodo *IV*. Este último, al agotar los intentos de retransmisión del mensaje de DATOS hacia el nodo fallido, eliminó la trayectoria (nodos que la forman) de todas sus tablas de enrutamiento y cambio de trayectoria utilizando la alterna *FD-T3D-EH*, como se muestra en la figura 57. Al llegar los datos al *Nodo de Acceso*, este intentó transmitir otro paquete de PETICION por la trayectoria con el menor costo hacia el nodo *IV*, pero al no responderle el nodo *VI*, eliminó este Nodo Siguierte de todas sus tablas de enrutamiento y encaminó la PETICION por el nodo *T3D*, el cual se convirtió como el nodo por defecto ya que es el único que ofrece un trayecto hacia el Nodo *IV*. La recolección de los datos siguió llevándose acabo de manera exitosa y se observo que el tiempo en que se recibieron los arreglos de datos por esta nueva trayectoria fue de 1.9 segundos (son tres saltos), esto a diferencia del protocolo anterior, el cual en condiciones similares, manejaba tiempos de recolección de paquetes mayores a 25 segundos, debido a que siempre el nodo *IV* intentaba transmitir por la primera trayectoria.

Al terminar de descargar los paquetes del nodo **IV**, se energizó nuevamente la interfaz inalámbrica del nodo **VI**, esta se integro rápidamente a la red utilizando los mensajes de control HOLA_Aislado y HOLA_Integración.

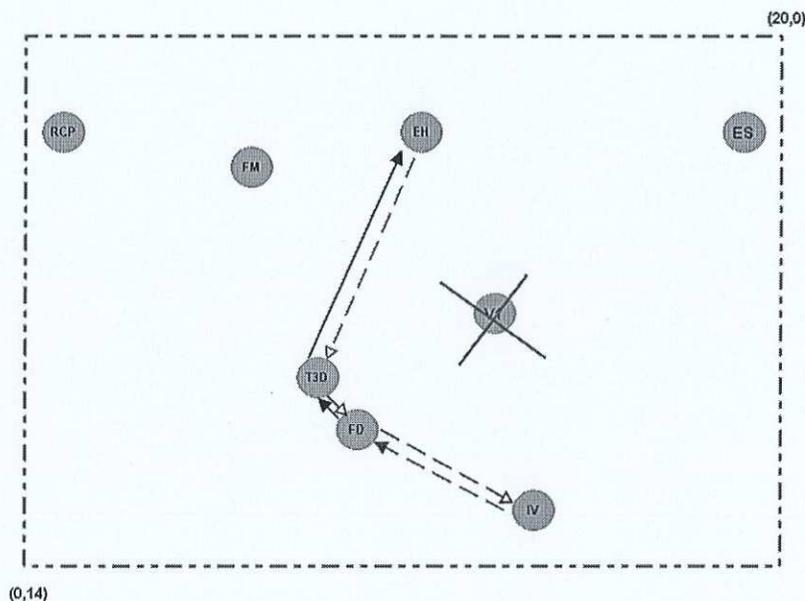


Figura57. : Trayectoria utilizada en la recolección de paquetes del *Nodo Sensor IV* cuando falla la trayectoria primaria utilizando el protocolo de enrutamiento *M a M*.

Para observar el funcionamiento del protocolo cuando los nodos en la red presentan una condición de Aislamiento, se solicitó una trayectoria hacia el nodo **RCP** difundiendo un mensaje RREQ, obteniéndose las trayectorias que se muestran en la figura 58. El mensaje RREP que recibió el *Nodo de Acceso* se encuentra en la parte inferior de la figura 55.

El *Nodo de Acceso* transmitió mensajes de PETICION y recibió paquetes de DATOS sin ningún problema, por lo que se emuló la pérdida del nodo **FM**, desconectándolo de la red. Al realizar esto se observaron dos situaciones, la primera de ellas se presentó cuando el *Nodo de Acceso* no pudo establecer comunicación con el *Nodo Siguiete FM* para transmitirle el mensaje de PETICION, por lo que al no contar la estación base con más *Nodos Siguietes* hacia el *Nodo Destino RCP*, lo eliminó junto con el nodo fallido **FM** de

sus tablas de enrutamiento y no existió manera de comunicarse con el nodo **RCP**. Al transcurrir unos minutos (depende del tiempo programado de los *Holas Periódicos*) se recibió un mensaje de Aislamiento por parte del Nodo **RCP** con una configuración de potencia mayor a la programada por defecto. Al recibir este mensaje de Aislamiento el *Nodo de Acceso* le respondió configurando su potencia de transmisión a la misma con la que le transmitió el mensaje el nodo **RCP**, haciendo posible el intercambio de paquetes con dicho nodo.

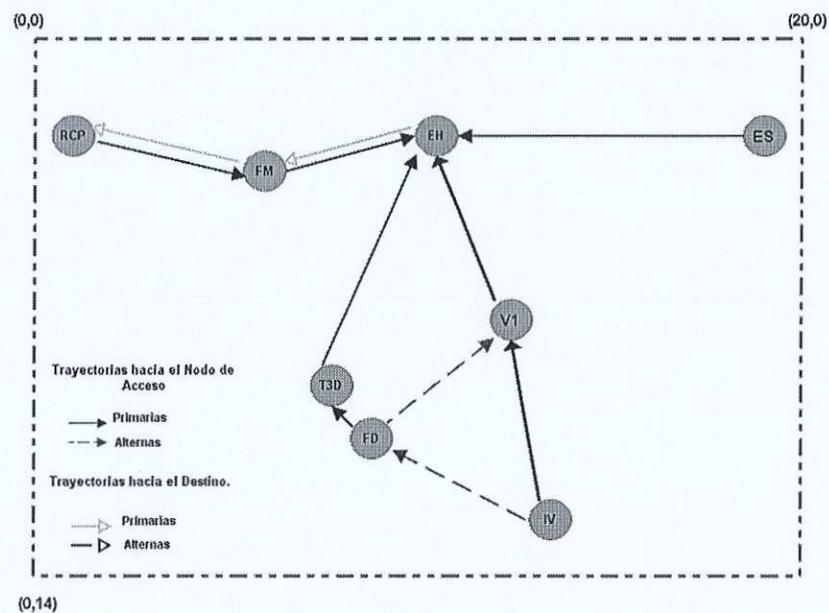


Figura58. : *Trayectorias formadas al solicitar rutas hacia el Nodo Sensor RCP utilizando el protocolo de enrutamiento por múltiples rutas hacia múltiples nodos M a M.*

Hay que señalar que el nodo **RCP** pudo conocer su situación de Aislamiento al enviar su mensaje periódico, en donde al no recibir respuesta por parte del Nodo Vecino **FM**, ejecutó una rutina de ajuste de ubicación con respecto a la estación base, la cual le entregó como resultado que se encontraba en una distancia infinita con respecto a esta, por lo que ejecutó de nueva cuenta la primera fase del protocolo en búsqueda de vecinos con una potencia mayor.

La segunda situación se presentó cuando el nodo **RCP** se encontraba transmitiendo paquetes de DATOS hacia al *Nodo de Acceso* y se desconectó el nodo **FD**, aquí el nodo **RCP**, al detectar que ha fallado la trayectoria con el menor costo hacia el *Nodo de Acceso*, ejecutó la rutina de ajuste de ubicación y entró inmediatamente a la primera fase del protocolo buscando integrarse a la red. De igual manera se integró a la red después de haber modificado su potencia de transmisión. En la figura 59 se muestra con que potencia de transmisión quedaron los nodos sensores después del intercambio de mensajes de integración. Con la nueva configuración de potencia se recolectaron más paquetes de DATOS sin ningún problema y en el transcurso de este proceso se volvió a conectar el nodo **FM**, el cual se integró rápidamente a la red.

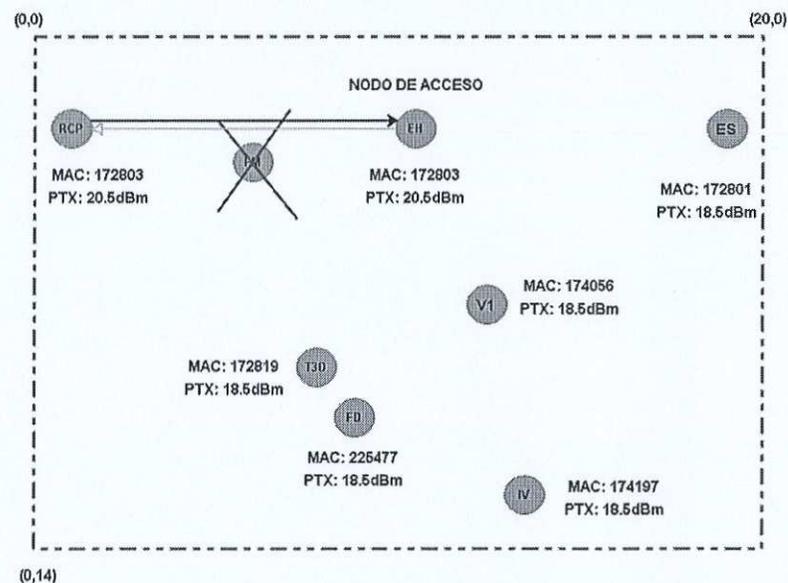


Figura59. : Potencia de transmisión empleada por los Nodos Sensores para resolver la problemática de aislamiento del Nodo Sensor RCP utilizando el protocolo de enrutamiento M a M.

Como se pudo observar en estas pruebas de funcionamiento, el protocolo de enrutamiento M a M pudo responder sin ningún problema a los cambios que se presentaron en la topología de la WAWSN e inclusive presentó mayor robustez que el protocolo anterior al auto configurarse sin que el *Nodo de Acceso* estuviera involucrado en dicho proceso.

VI.4. Ventajas y desventajas de los protocolos de enrutamiento implementados en las interfaces inalámbricas.

Las ventajas y desventajas más importantes que se pudieron observar en las pruebas de funcionamiento realizadas a la WAWSN implementada con los protocolos de enrutamiento diseñados, se resumen en la tabla X. En esta tabla se puede observar que a pesar de ser dos protocolos que siguen el mismo esquema de enrutamiento, difieren en aspectos tales como el consumo de los recursos del nodo sensor y la forma en la que mantienen actualizada sus tablas de enrutamiento.

Tabla X. Ventajas y Desventajas entre los protocolos de enrutamiento por múltiples trayectorias implementados

Protocolo de enrutamiento por trayectorias múltiples a un nodo.		Protocolo de enrutamiento por trayectorias múltiples a múltiples nodos.	
<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Número reducido de mensajes de control. • Utiliza pocos recursos de memoria y energía. 	<ul style="list-style-type: none"> • No posee un mecanismo de ajuste automático de la potencia de transmisión. • No resuelve problemas de Nodos Aislados. • Obtiene solo una trayectoria hacia el Nodo Destino. 	<ul style="list-style-type: none"> • Asegura la conexión de todos los nodos en la red. • Escoge la ruta de menor costo para enrutar los mensajes. • Forma múltiples rutas hacia el Nodos Destino y al Nodo de Acceso. • Posee un mecanismo de ajuste automático de la potencia de transmisión. 	<ul style="list-style-type: none"> • Número elevado de mensajes de control. • Utiliza más recursos de memoria y de energía.

Los resultados de las pruebas de funcionamiento que se mostraron en este capítulo junto con las mediciones de campo realizadas y son mostradas en el anexo A.4, proporcionaron la información necesaria (configuración de los radios, altura y ganancia de las antenas, selección de protocolo de enrutamiento), para realizar una correcta instalación del prototipo de comunicación inalámbrico en el valle de Mexicali.

Conclusiones y Trabajo a futuro.

VII.1. Conclusiones.

En esta tesis se desarrolló la circuitería y los programas necesarios para implementar la RDEFVM en un ambiente de laboratorio, lo cual permitió probar el funcionamiento de dos protocolos de enrutamiento por trayectorias múltiples. Al realizar pruebas de funcionamiento (emulando fallas de nodos e inserción de nuevos en la red, recolección de datos) se observó que ambos protocolos proporcionaron los parámetros de calidad de servicio que se demandan de la RDEFVM.

En dichas pruebas también se pudo observar que el protocolo de enrutamiento diseñado e implementado en esta tesis, mostró mejor adaptabilidad que el escrito por Cortez Vázquez [2006], debido a que tiene la capacidad de resolver en lo posible problemas de aislamiento, utilizando mensajes de control periódicos y un ajuste automático de la potencia de transmisión. Así también se comprobó empíricamente que al utilizar dicho protocolo se formaron enlaces confiables ya que cuenta con un algoritmo que le permite al nodo decidir solo conectarse con aquellos nodos vecinos que le transmiten paquetes por arriba de un umbral de recepción, dicho umbral puede ser programado por el usuario.

Se pudo constatar con mediciones realizadas en campo, (Telemática-Cerro Punta Banda, Valle de maneadero y Valle de San Antonio de las Minas) que los modelos de interfaz inalámbrica diseñados y construidos en esta tesis funcionan correctamente y pueden establecer comunicación a distancia de kilómetros.

Se realizaron mediciones del consumo de energía de las interfaces inalámbricas cuando se encuentran transmitiendo paquetes a diferentes potencias, de las cuales se encontró que los modelos de interfaz inalámbrica diseñados y construidos en esta tesis consumen casi un 40% menos energía que el modelo de Cortez Vázquez [2006], esto es atribuible a la fuente de alimentación empleada en el primer modelo, la cual como se pudo comprobar no es eficiente.

VII.2. Contribuciones.

Las contribuciones de este trabajo fueron las siguientes:

- Un sistema de comunicación inalámbrico completo (8 interfaces inalámbricas multi puertos, protocolos de enrutamiento, interfaces gráficas) que puede ser utilizado tanto para resolver la problemática presentada en la RDEFVM como en alguna otra aplicación que requiera recolectar información de nodos repartidos en una área amplia.
- Se proporcionan las herramientas necesarias para que el sistema pueda ser empleado como “cama de pruebas”, y así programar y probar en él diversos protocolos de enrutamiento.

VII.3. Trabajo a futuro.

En lo que respecta al trabajo que falta por realizar para que se pueda implementar el sistema de comunicación inalámbrico diseñado en el Valle de Mexicali, se tiene lo siguiente:

- Realizar pruebas del funcionamiento de la red en un entorno con distancias similares a las que se tienen en la RDEFVM y/o una serie de pruebas de enlaces punto a punto en el Valle de Mexicali, que proporcionen una medida real de

parámetros como intensidad de potencia recibida, comportamiento de las interfaces inalámbricas en climas extremos y correcta altura de las antenas.

- En esta tesis también se trabajó con el diseño y programación de páginas HTML y PHP que establecen conexión a una base de datos MySQL, con la finalidad de establecer conexión con el *Nodo de Acceso* para así empezar con la recolección de los datos de manera remota. Dichas páginas se encuentran ya alojadas en RISDEFVM [2008] por lo que falta realizar las modificaciones correspondientes a la interfaz gráfica del *Nodo de Acceso*, para que establezca conexión con la base de datos. Se requieren hacer las pruebas correspondientes.
- Instalación de las interfaces inalámbricas en el campo de acción (Mástiles, antenas, línea de transmisión) y pruebas del sistema.

El trabajo desarrollado en esta tesis como se pudo observar cubre con los objetivos planteados, más sin embargo para observar todas las ventajas que ofrecen los protocolos de enrutamiento implementados, sería conveniente que se construyeran más interfaces inalámbricas para formar diferentes topologías de red, evaluando el desempeño de los mismos de manera más profunda, utilizando métricas como caudal eficaz (throughput), pérdida de paquetes, retardo promedio, tiempo de configuración de la red, etc.

En lo que respecta al protocolo de enrutamiento propuesto en esta tesis, no se realizaron algoritmos que ejecutaran acciones acorde a las variaciones en los niveles de la energía del *Nodo Sensor*. Por lo que sería conveniente adaptar alguno de los algoritmos de enrutamiento por trayectorias múltiples propuestos en la literatura tales como [Gallardo López, J. R. *et al*, 2007; Lu Y. M. y Wong, 2007] y/o un modelo de control de potencia en la transmisión de paquetes que se ajuste automáticamente a los cambios que se presentan en el entorno [Shan Lin y Jingbin Zhang, 2006], que minimicen el consumo energético del *Nodo Sensor* (menor número de retransmisiones, balanceo de cargas, etc.).

Al contar con las herramientas de desarrollo de MICROCHIP de forma gratuita y de fácil entendimiento (microcontroladores, compiladores, programador, extensa información técnica), se recomienda que para futuras mejoras de la interfaz inalámbrica se utilice el microcontrolador PIC24FJ256GB106, el cual dentro de sus características principales ofrece mas capacidad de almacenamiento, contienen mas puertos de comunicación y proporciona un reloj de tiempo real, el cual seria de gran utilidad para manejar el tiempo del sistema de manera menos compleja.

Referencias.

Ács G. y Buttyán L. 2007. *A Taxonomy of Routing Protocols for Wireless Sensor Networks*. Laboratory of Cryptography and Systems Security (CrySyS) Department of Telecommunications Budapest University of Technology and Economics, Hungary.

Al-Karaki, J.N. Kamal, A.E. 2004. Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey. *IEEE Wireless Communications*. 11(6):6-28p.

Angulo J.M y Angulo I. 1999. *Microcontroladores PIC: Diseño practico de aplicaciones 1ª parte*. McGraw-Hill Interamericana. 2ª Edición. España.312p.

Baronti P., Pillai P., Chook V., Chessa S., Gotta A. y Hun Y.F. 2007. *Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards*. *Computer Communications*, 30(7):1655-1695p.

Cano J.C., Cano J.M., González E., Calafate C. 2006. *Evaluation of the energetic impact of Bluetooth low-power modes for ubiquitous computing applications*, Proceedings of the 3rd ACM international workshop on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor and ubiquitous networks, 6 de Octubre, Terromolinos, España.

Chang J.-H. y Tassiulas L. 2004. *Maximum Lifetime Routing in Wireless Sensor Networks*. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*IEEE/ACM Transactions on Networking (TON).12(4): 609 – 619p.

Chen B., Jamieson K., Balakrishnan H., Morris R. 2002. *SPAN: an energy-efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks*. *Wireless Networks*, 8(5): 481-494p.

Cortez Vázquez M. 2006. *Diseño e implementación de una Red Inalámbrica de Área Amplia*. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, México, 64p.

Cruselles Forner E. y Melús Moreno J.L. 1996. *Secuencias pseudoaleatorias para telecomunicaciones*. Edicions UPC. España. 280p.

Covarrubias Rosales D.H. 2007. *Comunicaciones Móviles Celulares*. Curso de Maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, México. Inéditos.

Ganesan, D.; Govidan, R.; Shenker, S. y Estrin, D. 2000. "Highly-Resilient, Energy-Efficient Multipath Routing in Wireless Sensor Networks", *Mobile Computing and Communications Review*, 1(2): 1-13 p.

Gallardo Lopez, J. R.; González Luque A.; Villaseñor González L.A. y Sánchez García J. 2007. *Multipath Routing Using Generalized Load Sharing For Wireless Sensor Networks*. *Wireless and Optical Communications 2007*, Montreal, Québec, Canadá, 6 pp.

Heinzelman W, Kulik J, Balakrishnan H. 1999. *Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks*. *Proceedings of ACM/IEEE MobiCom'99*, Seattle, WA, U.S.A., 174-185.

He T., Stankovic J.A., Lu C., Abdelzaher T. 2003. *SPEED: a stateless protocol for real-time communication in sensor networks*. Distributed Computing Systems, 2003. Proceedings. 23rd International Conference on. 19-22 May.46-55p.

Kuorilehto M., Hännikäinen M.,Hämäläinen T. D. 2005. *A survey of application Distribution in Wireless Sensor Networks*. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. 5(5):774 – 788p.

Li Y., Chen J., Lin R. y Wang Z. 2005. *A reliable routing protocol design for wireless sensor networks*. : Mobile Adhoc and Sensor Systems Conference, 2005. IEEE International Conference on. 7-10 Nov. 4 p.

Lou W. 2005. *An efficient N-to-1 multipath routing protocol in wireless sensor networks*. 2nd IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems. Washington DC.

Lu Y. M. y Wong W. S. V. 2007. *An energy-efficient multipath routing protocol for wireless sensor networks*. International Journal of Communication Systems. 20(7):747–766p.

Mainwaring A. Polastre J. Szewczyk R. Culler D. Anderson John. 2002. *Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring*. International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications, Septiembre 28, Atlanta, Georgia, USA.88-97p.

Murthy C. S. R. y Manoj B. S. 2004.*Ad Hoc Wireless Networks: : Architectures and Protocols*. Prentice Hall.1st Edition. EEUU. 857p.

Nasser, N., Yunfeng C. 2007. *Secure Multipath Routing Protocol for Wireless Sensor Networks*. Distributed Computing Systems Workshops, 2007. ICDCSW apos;07. 27th International Conference on. June 22-29.

O'Hare G.M.P., O'Grady M.J., Marsh D., Ruzzelli A. G. y Tynan R. 2004. *Autonomic Wireless Sensor Networks: Intelligent Ubiquitous Sensing*. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 17(7):741-748p.

Pottie G. J., Kaiser W. J. 2000. Wireless integrated sensor networks. Communications of the ACM, 43: 51–58p.

Qiangfeng J. y Manivannan D. 2004. *Routing Protocols for Sensor Networks*. In Proceedings of the IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC 2004), January 5-8, Las Vegas, Nevada, USA.

Ramírez Mondragón E. 2007. Mecanismo de enrutamiento para redes híbridas inalámbricas (infraestructura – AD HOC). Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, México, 149p.

Rappaport T. 2001. *Wireless Communications: Principles and Practice*. Pearson education. 2nd Edition. Upper Saddle River, NJ 07458.736p.

Sánchez García J. 2006. *Sistemas de Comunicaciones Digitales*. Curso de Maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, México. Inéditas.

Sánchez Laguna J:A. 2006. *Algoritmos de Encaminamiento Multicast con reducido consumo energético para Redes de Sensores Inalámbricos*. Tesis doctoral. Universidad de Murcia Departamento de Ingeniería de la Información y las Comunicaciones. España

Steere D.C., Baptista A., McNamee D., Pu C., Walpole J. 2000. *Research challenges in environmental observation and forecasting systems*. International Conference on Mobile Computing and Networking Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking. Boston, Massachusetts, United States.292 – 299p.

Sohraby K., Minoli D., Znati T. 2007. WIRELESS SENSOR NETWORKS Technology, Protocols, and Applications. WILEY. Hoboken, New Jersey.301.

Werner G., Lorincz, K., Ruiz M., Marcillo O., Johnson J., Lees J., Welsh M. 2006. *Deploying a wireless sensor network on an active volcano*. Internet Computing, IEEE, 10(2): 18 – 25p.

Xu Y., Heidemann John., Estrin D. 2001. *Geography-informed Energy Conservation for Ad Hoc Routing*. In Proceedings of the Seventh ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM 2001) Julio 16–21, Roma, Italia.

Paginas Electrónicas.

Microchip. *MPLAB C Compiler for PIC18 MCUs*.

http://www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS_GET_PAGE&nodeId=1406&dDocName=en010014. /Septiembre 2007

Microchip. *PIC18F2550 Family Data Sheet*.

<http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en010280>
Septiembre 2007.

Toquebeuf R.y Lycée C. D. *COMPILATEUR Microchip C18*.

<http://www.aix-mrs.iufm.fr/formations/filieres/ge/data/PIC/PICC/MCC18%20v14.pdf>.
Septiembre 2007

Aerocomm. *AC4790 900 MHz OEM transceivers. User's Manual, version 1.3*
<http://www.aerocomm.com/>. Septiembre 2007.

Campbell Scientific *CR10X measurement and control module operator's manual*.
Revision 5/97. Septiembre 2007.

Ruiz Robredo G. A. *Electrónica Básica para Ingenieros*.
<http://grupos.unican.es/dyvci/ruizrg/html.files/LibroWeb.html/> Octubre 2007

Jones D.L. 2004. *PCB Design Tutorial Rev A*.
<http://www.alternatezone.com/electronics/files/PCBDesignTutorialRevA.pdf>. Octubre
2007

Microchip. *PIC18F87J50 Family Data Sheet*
<http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en027172>.
Noviembre 2007.

Instituto de Ingenieros en Electricidad y Electrónica (IEEE). *Estándar IEEE 802.15.4*.
<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4a-2007.pdf>. /Noviembre 2007.

RISDEFVM. Red Inalámbrica de Sensores de Deformación del Valle de Mexicali.
<http://redsensores.webcindario.com/> Junio 2008
Usuario: jaime - Contraseña: sanchez.

Anexos.

A.1 Análisis del consumo de potencia.

Para conocer cual será el consumo de potencia que tendrían las interfaces inalámbricas al transmitir los arreglos de los datos generados en el día, se tiene que realizar un análisis que involucra factores tales como el número máximo de retransmisiones de un paquete, el tiempo de transmisión y recepción de un paquete, número de nodos vecinos, forma de comunicación entre radios, etc.

La primera tarea consiste en investigar, la potencia que consumen los diferentes modelos de interfaz inalámbrica en sus diversos modos de funcionamiento (recepción y de transmisión de paquetes). Esto se puede realizar de dos maneras, una de ellas es tomar los valores de consumo de los dispositivos que forman la interfaz en sus hojas de especificaciones de datos y la segunda es medir con instrumentos de laboratorio (multímetro digitales, osciloscopios, etc) la corriente que circula por la interfaz inalámbrica. Para contar con datos que se acerquen más al consumo real se optó por medir la corriente suministrada a las interfaces utilizando un multímetro digital marca WAVETEK modelo 27XT y un osciloscopio digital marca GW INSTEK modelo GDS2104.

A todos los modelos de interfaz inalámbrica se les alimentó con un arreglo de baterías marca STEREN que entregan 12.5V (valor medido) y que tienen una capacidad de 4 AH. El multímetro digital proporcionó sin ningún problema el valor de la corriente de las interfaces inalámbricas cuando se encontraban en modo de recepción, pero al transmitir paquetes mostro ciertas inconsistencias en las lecturas. Esto debido a que los tiempos de transmisión de paquetes son muy cortos ($\leq 50\text{ms}$), por lo que se utilizó el osciloscopio digital para realizar estas lecturas.

Para que el osciloscopio pudiera mostrar los valores del consumo de corriente de las interfaces inalámbricas, fué necesario conectar una resistencia simbólica de 1 ohm (la resistencia utilizada fue medida dando como resultado 1.1ohm) en serie entre la interfaz inalámbrica y el arreglo de baterías. Así al medir el voltaje entre las terminales de la resistencia con la punta del osciloscopio y aplicando la ecuación (10) fue posible obtener el valor máximo de corriente al transmitir paquetes. Los valores de corriente y potencia, que se obtienen al utilizar la ecuación (11), realizando el procedimiento descrito se muestran en la tabla XI.

$$I_{(mA)} = \frac{\text{Voltaje medido}_{(mV)}}{1.1\Omega} \quad (10)$$

$$P_{(W)} = V_{BATERIA} \times I_{(A)} \quad (11)$$

Tabla XI. Corriente medida y Potencia calculada de los diferentes modelos de interfaz inalámbrica.

Interfaz Inalámbrica	I (mA)			P (W)		
	1	2	3	1	2	3
Modos de funcionamiento.						
Espera/Recibiendo				P_{RX}		
	42.8	33.5	37.3/41.7	0.535	0.42	0.467/0.521
Transmitiendo				P_{TX}		
11 dBms	356.4	200	203	4.45	2.5	2.54
18.5 dBm	400	221.3	225.5	5	2.77	2.82
22dBm	472.8	257	261.8	5.91	3.21	3.28
27dB	582	352.5	356.4	7.28	4.41	4.45
28dBm	607.3	387	392.8	7.59	4.84	4.91
29	749	425.8	429	9.36	5.33	5.36
30.7dBm	858.18	515	520	10.7	6.44	6.5

Al contar con los valores de la corriente medida y potencia calculada, es posible obtener el consumo de los modelos de interfaz inalámbrica cuando se transmite un paquete de 128 bytes. La ecuación utilizada es la (12) donde el resultado esta expresado en W/H.

$$C_{POTpkTX} (WH) = P_{TX} \times t_{paqtxH} \quad (12)$$

donde $C_{POTpkTX}$ es la potencia que consume la interfaz inalámbrica al transmitir un paquete, P_{TX} es la potencia de la interfaz inalámbrica en modo de transmisión y t_{paqtxH} es el tiempo que dura transmitiendo el radio un paquete expresado en horas. La ecuación (13) determina el consumo de potencia en la recepción de un paquete.

$$C_{POTpkRX} (WH) = P_{RX} \times t_{paqrXH} \quad (13)$$

donde $C_{POTpkRX}$ es la potencia que consume la interfaz al recibir un paquete, P_{RX} es la potencia cuando se recibe un paquete y t_{paqrXH} es el tiempo en el que se recibe un paquete expresado en Horas.

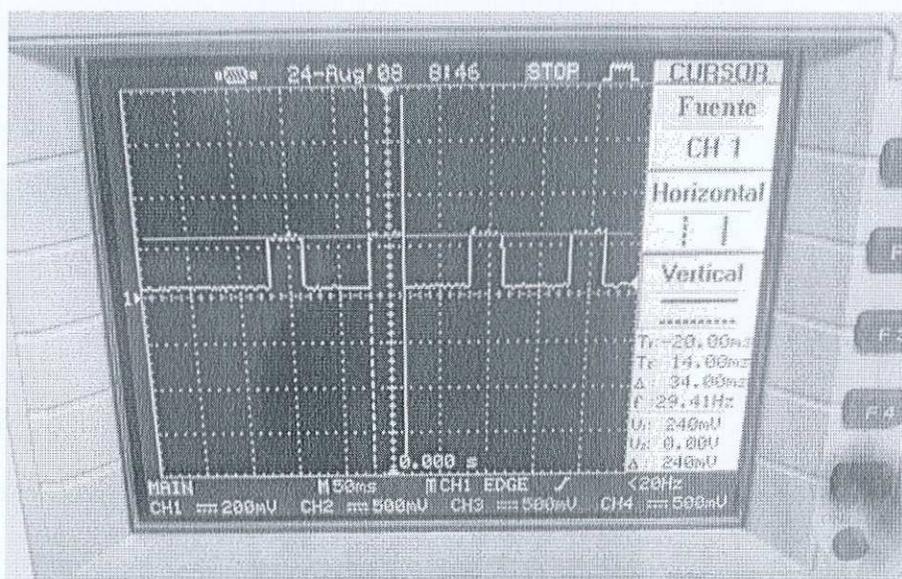


Figura60. : Lectura del tiempo y el consumo de corriente con un osciloscopio del tercer modelo de interfaz inalámbrica transmitiendo paquetes a mínima potencia.

La tarjeta de adquisición de datos CR10X puede ser configurada para guardar lecturas de los datos generados por los sensores cada minuto, entonces los arreglos generados serian, 60/ hora y 1440/ día.

Por tal motivo, para conocer de manera aproximada el consumo total de potencia que tendrá un *Nodo Sensor* cuando se transmita una cantidad de arreglos al *Nodo de Acceso*, se utilizan las ecuaciones 14 y 15.

$$C_{PotTXFD} = N_{arreglos} \times (C_{POTpktTX} + C_{POTpktRX}) \times N_{vecinos} \times N_{retx} \quad (14)$$

$$C_{PotTXHD} = N_{arreglos} \times C_{POTpktTX} \times N_{vecinos} \times N_{retx} \quad (15)$$

donde $C_{PotTXFD}$ y $C_{PotTXHD}$ es el consumo de energía en modo de comunicación Full Duplex y Half Duplex respectivamente, $N_{arreglos}$ es el número de paquetes que serán transmitidos, $N_{vecinos}$ es el número de nodos vecinos que tiene el *Nodo Sensor* los cuales posiblemente le enviaran paquetes que deberá retransmitirlos al *Nodo de Acceso* y N_{retx} son las veces que se retransmite un paquete.

Es también de interés tener conocimiento del tiempo que tardaría el *Nodo de Acceso* en recolectar los paquetes generados al día. Una expresión que proporcionaría de manera aproximada este tiempo, es la ecuación (16).

$$t_{recoleccion} = (N_{arreglos} \times t_{salto} \times N_{retx} \times t_{ventana}) \times N_{Nodos} \quad (16)$$

donde $N_{arreglos}$ es el número de arreglos que serán transmitidos hacia el *Nodo de Acceso*, t_{salto} es el tiempo que utiliza el radio para transmitir un paquete cuando se encuentra operando en modo de funcionamiento Half Duplex (50 ms) y Full Duplex (100ms), $t_{ventana}$ es el tiempo que se retrae la tarjeta de comunicación inalámbrica entre retransmisiones (50ms a 12.8s), y N_{Nodos} es el número de nodos por los que debe saltar cada paquete antes de llegar al *Nodo de Acceso*. No es fácil predecir de manera exacta la cantidad de tiempo que se tardaría en recolectar los datos el *Nodo de Acceso*, ya que existen factores que afectan a estos tiempos, como la distancia entre las interfaces, la densidad de la

red, tiempo de procesamiento del microcontrolador, velocidad de transmisión entre microcontrolador y radio, modos de funcionamiento del radio, etc. Pero el resultado de la ecuación 16 es suficiente para los fines de esta tesis.

La capacidad de la batería necesaria para cubrir las necesidades del sistema, se obtiene a partir del consumo promedio diario, dado por la ecuación 17 y 18, la cual involucra el consumo total al transmitir un número de arreglos en modo Half y Full Duplex entre el voltaje de la batería.

$$C_{diarioFD} = C_{PotTXFD} / V_{Bat} \quad (17)$$

$$C_{diarioHD} = C_{PotTXHD} / V_{Bat} \quad (18)$$

En la tabla XII se muestra el consumo de potencia que se tendrá en el *Nodo Sensor*, al implementarlo con cada una de las interfaces inalámbricas, cuando se transmitan los arreglos almacenados en la memoria del CR10X hacia el *Nodo de Acceso*. Así también se muestra el tiempo aproximado que le tomará a la estación base recolectar una cantidad determinada de arreglos de datos y la capacidad de la batería necesaria para que el sistema funcione adecuadamente cuando en el sistema se presenten condiciones extrema. Los valores de los parámetros utilizados para generar esta tabla fueron los siguientes:

El número de arreglos a transmitir ($N_{arreglos}$) es de 1440, con un número máximo de retransmisiones por paquete (N_{retx}) de 255, a una distancia del *Nodo de Acceso* de 4 saltos (N_{Nodos}). Se contempla que el nodo retransmitirá paquetes de tres nodos vecinos ($N_{vecinos}$), con un tiempo de retracción $t_{ventana}$ de 50ms.

Como se puede observar en base a los resultados de la tabla XI y XII, la interfaz inalámbrica que presentó mas consumo fue la primera versión, esto debido a la fuente de alimentación empleada, que a pesar de contener menos dispositivos que todas las demás, no

A.2 Diagrama y negativo del circuito impreso del primer modelo de interfaz inalámbrica.

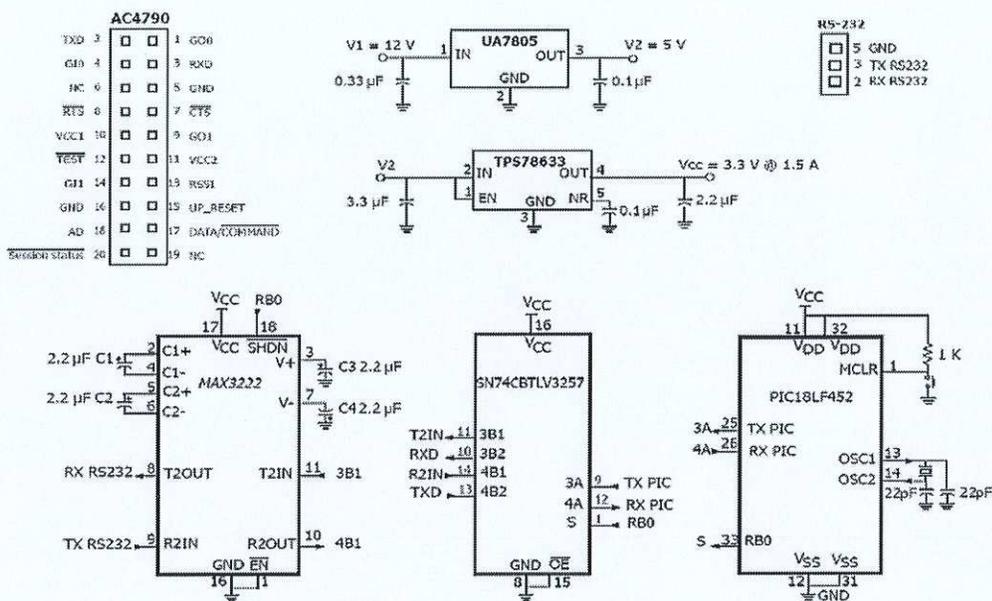


Figura61. :Diagrama del primer modelo de interfaz inalámbrica.

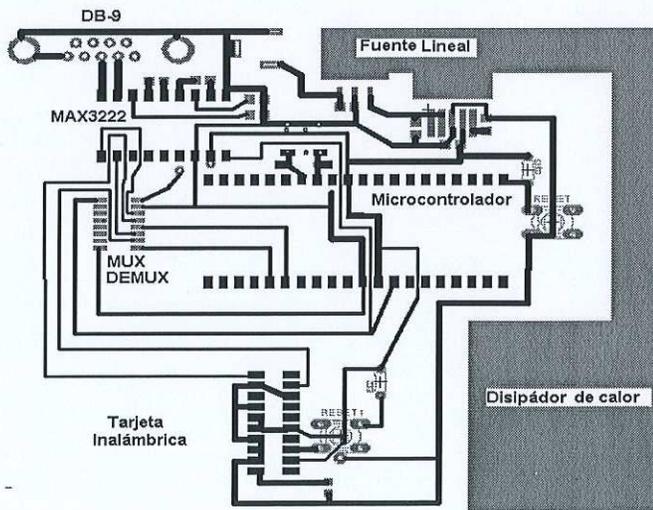


Figura62. : Negativo del PCB del primer modelo de interfaz inalámbrica.

A.3 Diagramas y negativos del circuito impreso del segundo y tercer modelo de interfaz inalámbrica.

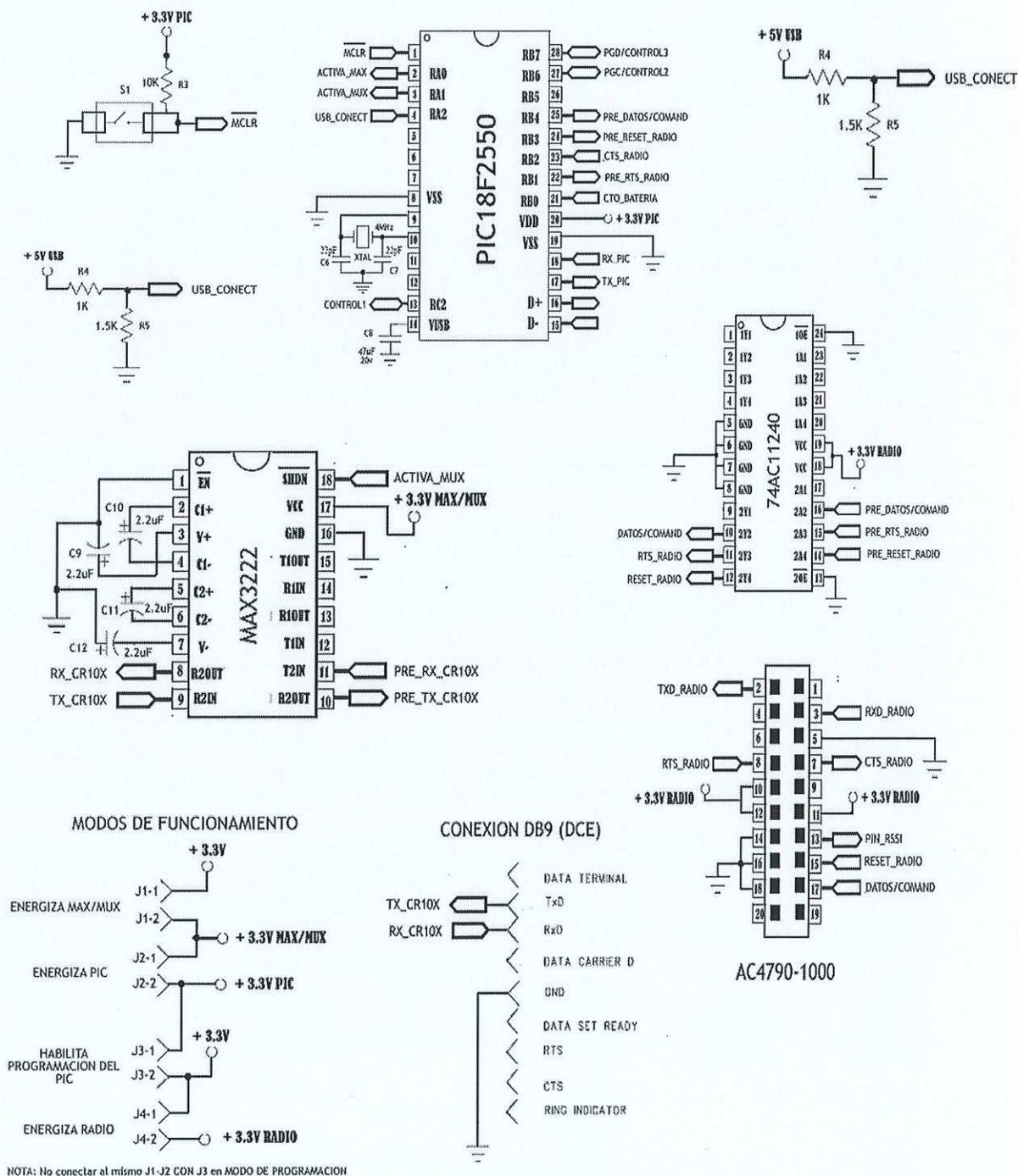


Figura63. : Diagrama del segundo modelo de interfaz inalámbrica.

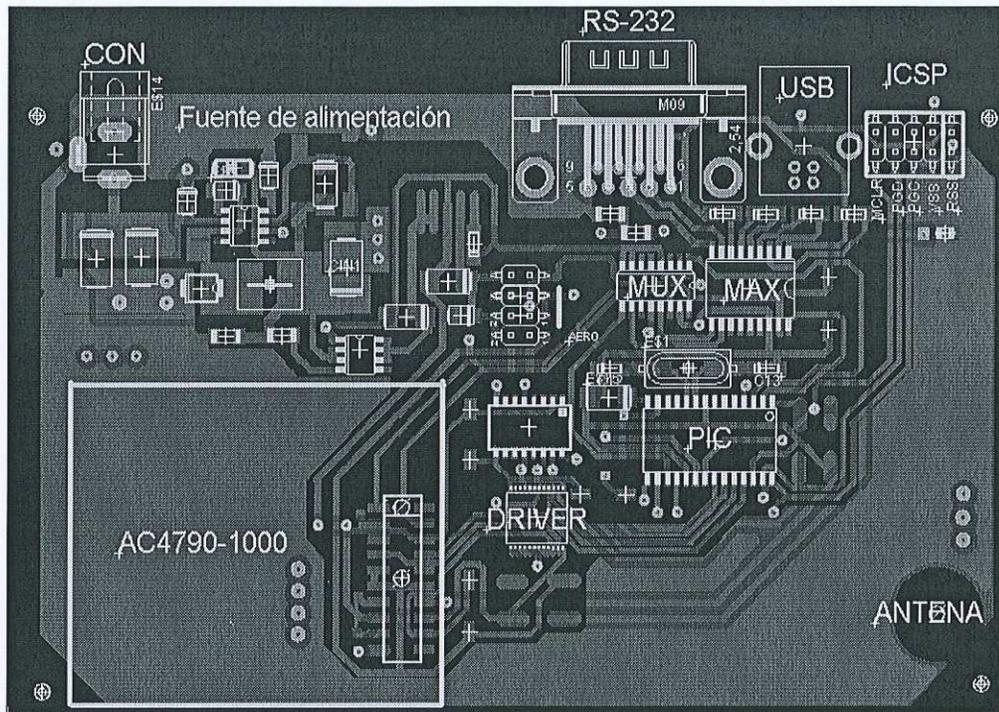


Figura64. : Negativo del PCB del segundo modelo de interfaz inalámbrica.

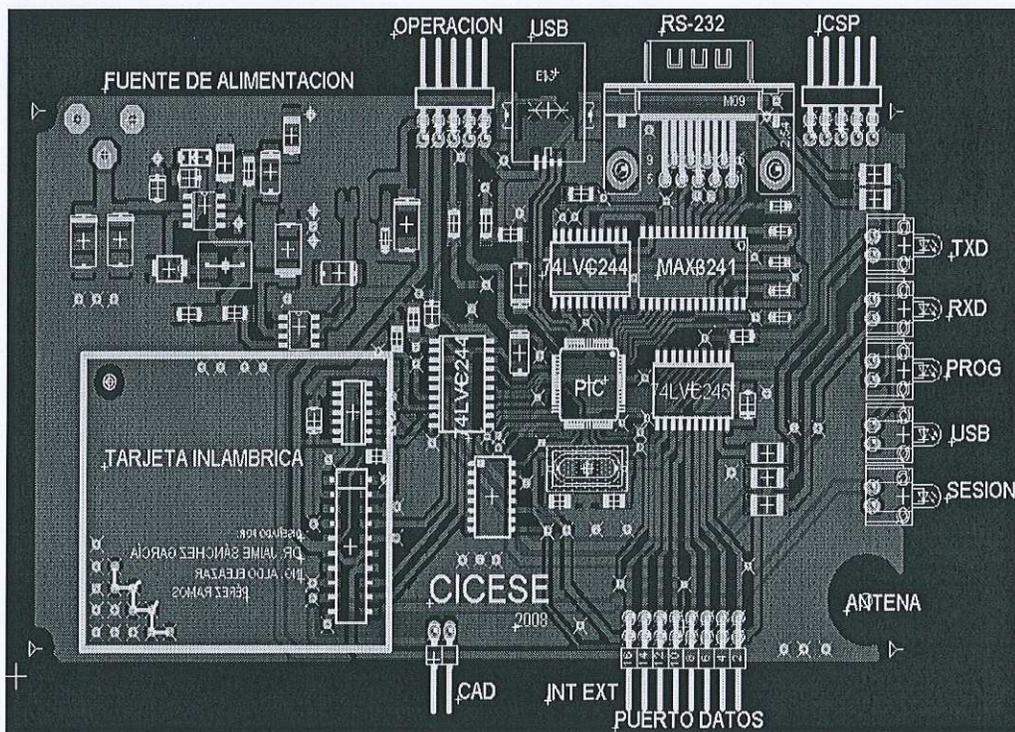


Figura65. : Negativo del PCB del tercer modelo de interfaz inalámbrica.

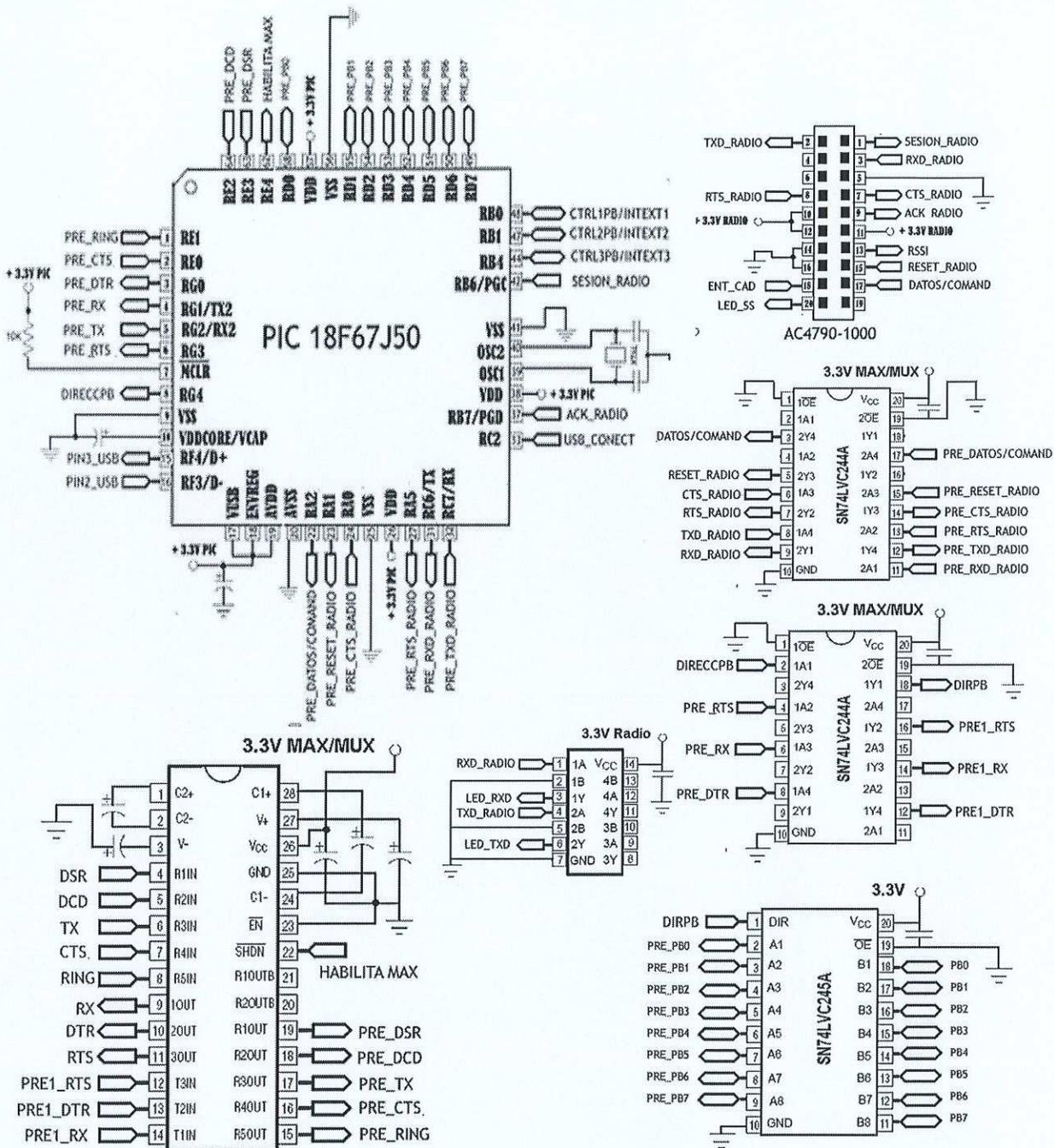
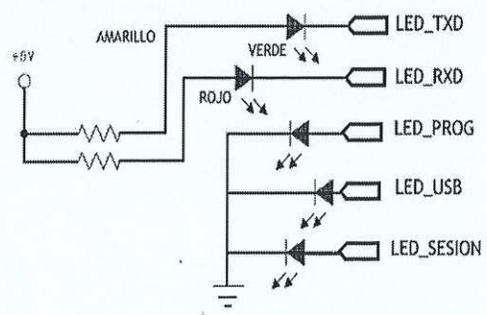


Figura66. : Diagrama del tercer modelo de interfaz inalámbrica.



A.4 Resultados de las mediciones de enlaces punto a punto.

INTENSIDADES CALCULADAS.

Parámetros:

Modelo de Espacio Libre.

$G_t=2\text{dB}$; $L_t=0.5\text{dB}$. $d=1$ a 20km

$G_r=2\text{dB}$; $L_r=0.5\text{dB}$. $P_t=9$ a 28 dBms

Tabla XIII. Tabla de valores calculados de intensidad de señal recibida utilizando el modelo de espacio libre.

Distancia Potencia	1km	2km	3km	4km	6km	8km	10km	12km	14km	16km	18km	20km
9	-79.63	-85.65	-89.17	-91.67	-95.19	-97.69	-99.63	-101.21	-102.55	-103.71	-104.73	-105.65
16.5	-72.13	-78.15	-81.67	-84.17	-87.69	-90.19	-92.13	-93.71	-95.05	-96.21	-97.23	-98.15
20.5	-68.13	-74.15	-77.671	-80.17	-83.69	-86.19	-88.13	-89.71	-91.05	-92.21	-93.23	-94.15
25	-63.63	-69.65	-73.17	-75.67	-79.19	-81.69	-83.63	-85.21	-86.55	-87.71	-88.73	-89.65
26	-62.63	-68.65	-72.17	-74.67	-78.19	-80.69	-82.63	-84.21	-85.55	-86.71	-87.73	-88.65
27	-61.63	-67.65	-71.17	-73.67	-77.19	-79.69	-81.63	-83.21	-84.55	-85.71	-86.73	-87.65
27.5	-61.13	-67.15	-70.67	-73.17	-76.69	-79.19	-81.13	-82.71	-82.71	-85.21	-86.23	-87.15
28.7	-59.93	-65.95	-69.47	-71.97	-75.49	-77.99	-79.93	-81.51	-82.85	-84.01	-85.03	-85.95

INTENSIDADES MEDIDAS CON ANALIZADOR DE ESPECTROS EN LA AZOTEA DE LA DFA.

Parámetros:

$G_t=2\text{dB}$; $L_t=0.5\text{dB}$. $ATT_{tx}=30\text{dB}$; $ht=0.80\text{m}$; $d=1$ a 20m

$G_r=2\text{dB}$; $L_r=0.5\text{dB}$. $ATT_{rx}=30\text{dB}$; $hr=0.80\text{m}$; $P_t=9$ a 28 dBms

Tabla XIV. Tabla de valores medidos de intensidad de señal recibida utilizando el Analizador de Espectros.

Distancia Potencia	1m	2m	3m	4m	6m	8m	10m	12m	14m	16m	18m	20m
9	-81.2	-87	-91	-92.5	-96.5	-	-	-	-	-	-	-
16.5	-73.4	-79	-82.7	-86	-88.5	-91.7	-94	-	-	-	-	-
20.5	-69	-75	-78	-81	-84	-86.5	-89	-90	-92	-93.5	-	-
25	-64	-70.4	-74	-76	-80	-82	-84.7	-86.5	-87.7	-88.4	-89.6	-91.3
26	-63	-69.7	-73.3	-75.8	-79.6	-81	-83.8	-85.6	-87	-87.6	-88.9	-90
27	-61.4	-67.6	-72.5	-75	-78.6	-81	-82.7	-85	-86	-87	-88	-89
27.5	-62	-67.2	-71.3	-74	-78	-80	-82	-83	-85.5	-86	-87.5	-88