

TESIS DEFENDIDA POR
Magali Cortez Vázquez
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

Dr. Jaime Sánchez García
Director del Comité

Dr. José Rosario Gallardo López
Miembro del Comité

Dr. Luis A. Villaseñor González
Miembro del Comité

M.C. Moisés Castro Delgado
Miembro del Comité

Dra. Ewa Glowacka Nita
Miembro del Comité

Dr. Arturo Velázquez Ventura
*Coordinador del programa de
posgrado en Electrónica y
telecomunicaciones*

Dr. Raúl Ramón Castro Escamilla
Director de estudios de posgrado

17 de Noviembre de 2006

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



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

Diseño e implementación de 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:

MAGALI CORTEZ VAZQUEZ

Ensenada, Baja California, México, noviembre de 2006.

RESUMEN de la tesis de **Magali Cortez Vázquez**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de **MAESTRO EN CIENCIAS en ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES** con orientación en Telecomunicaciones. Ensenada, Baja California, México. Noviembre 2006.

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES DE ÁREA AMPLIA

Resumen aprobado por:

Dr. Jaime Sánchez García
Director de Tesis

En los últimos años, con el avance en materia de circuitos integrados de comunicaciones y radiofrecuencia, se han generado nuevas tecnologías inalámbricas. Las redes inalámbricas de sensores representan hoy en día una de las tecnologías más novedosas. En general, este tipo de redes consiste de un número de nodos distribuidos en un área, que se utilizan para recolectar y procesar datos generados por sensores.

Estas redes facilitan la recolección de datos en áreas de difícil o costoso acceso para las personas, por lo que son muchas las aplicaciones que han surgido en torno a ellas, incluidas las aplicaciones militares y las de monitoreo del medio ambiente.

El radio de cobertura de este tipo de redes puede ampliarse considerablemente ya que los nodos que la integran pueden comunicarse formando una red ad hoc, en la cual los datos son enviados de un nodo fuente a un nodo destino a través de nodos intermedios.

Existen sistemas comerciales de comunicación inalámbricos desarrollados bajo el estándar para redes de sensores 802.15.4, que brindan cobertura de área personal, lo que funciona en aplicaciones en donde los nodos están esparcidos en un área pequeña.

El problema surge cuando se requiere dar cobertura a un nivel urbano o mayor, en donde los nodos están separados por grandes distancias y para formar la topología de red ad hoc, requieren transmitir con suficiente potencia para alcanzar a sus nodos vecinos, lo cual no es posible si se usan sistemas comerciales para redes de sensores debido a que éstos transmiten con poca potencia (algunos dBm).

En particular, la Red de deformaciones del valle de Mexicali RDEFVM del departamento de sismología del CICESE, presenta un escenario en el que los nodos se encuentran separados por varios kilómetros. La recolección de los datos generados por los nodos se hace manualmente mediante visitas mensuales a campo, lo que origina un retraso en el análisis de los datos adquiridos, e implica un costo económico y físico.

En esta tesis se presenta el diseño e implementación de un sistema de comunicación inalámbrico específico para una red de sensores de área amplia capaz de comunicarse en forma ad hoc. Se utilizan tarjetas inalámbricas que transmiten con gran potencia a las

que se agrega la capacidad de comunicarse en forma ad hoc por medio de un microcontrolador, mismo que se encarga de la interacción con los sensores. El sistema está diseñado para interactuar con una tarjeta de adquisición de datos y se considera un panel solar para alimentarlo. Asimismo, se presenta la interfaz gráfica diseñada para la adquisición de los datos de la red, y la página electrónica para la adquisición remota de los datos a través de Internet.

En principio, el sistema diseñado intenta dar solución al problema de recolección de datos que presenta la Red de deformaciones del valle de Mexicali. Sin embargo, el sistema desarrollado puede usarse en cualquier aplicación que requiera de comunicación inalámbrica de largo alcance y que use la tarjeta de adquisición CR10X de Campbell Scientific.

Palabras clave: red de sensores, redes inalámbricas, área amplia, microcontroladores, tarjeta de adquisición CR10X.

ABSTRACT of the thesis presented by Magali Cortez Vázquez, as a partial requirement in order to obtain the **MASTER IN SCIENCES** DEGREE in ELECTRONICS and TELECOMMUNICATIONS. Ensenada, Baja California, Mexico. November 2006.

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A WIDE AREA WIRELESS SENSOR NETWORK

Approved by:

Dr. Jaime Sánchez García
Thesis director

Due to advances in communication integrated circuits and radio frequency technology over the last few years, new wireless technologies have been generated. Nowadays, the wireless sensors networks (WSN) are one of the most popular technologies. Generally, a sensor network consists of a large number of sensor nodes that are densely deployed over an area. These networks are used to collect and process data, and transmit sensed information to interested users.

WSN facilitate the data collection in places where it is difficult or expensive to access for the people. The application areas of sensor networks include military and environmental monitoring.

When deployed in large numbers, sensor nodes with limited radio communication range form an ad hoc network. An ad hoc network is basically a peer-to-peer multi-hop wireless network where information packets are transmitted from source to destination, via intermediate nodes.

Commercial wireless communication systems developed under the IEEE 802.15.4 sensor network standard, work in applications where the nodes are deployed in a small area. The problem appears when urban or greater coverage area is required, where the nodes are separated by great distances; to form the ad hoc network, they require transmitting with sufficient power to reach to his neighbor nodes, which is not possible if commercial wireless sensors systems are used because these transmit with low power (few dBm).

In particular, the Mexicali Valley Deformations Network RDEFVM of the CICESE seismology department is a network where the nodes are separated by several kilometers. The data generated by the sensors are manually collected with a periodicity monthly through field visits, which originates a delay in the analysis of the collected data, and implies an economic and physical cost.

This thesis presents the design and implementation of a specific wireless communication system for a wide area sensor network. Great power wireless

transceivers are used, the capacity to form ad hoc network is added by a microcontroller, which is in charge of the interaction with the sensors. The system is designed to interact with a data logger and considers a solar panel that charges a 12 V battery. Also, the designed graphical interface for the acquisition of the data of the network, and the WEB page for the remote acquisition of the data through Internet are presented.

In principle, the designed system tries to give a solution to the problem of data collection that presents the RDEFVM. Nevertheless, the developed system can be used in any application that it requires of wide area wireless communication and that uses the Campbell Scientific data logger CR10X.

Key words: sensor networks, wireless networks, wide area, microcontroller, datalogger CR10X.

A Pepe
Por ser mi amor, mi cómplice y todo

Agradecimientos

Son varias las personas a las que quiero agradecer su apoyo en la realización de esta tesis. Comenzaré por agradecer a los que hicieron posible mi estancia en Ensenada. Primeramente a mis papas y hermana Sandra por apoyarme económicamente para realizar el viaje a Ensenada. Posteriormente, quiero agradecer la beca otorgada durante dos años por el CONACYT. También gracias al CICESE por la beca de un mes otorgada como estímulo para asistir al curso propedéutico y posteriormente por la beca otorgada como apoyo para conclusión de tesis de maestría.

Al doctor Arturo Velásquez, a Caro y Néstor que me dieron la bienvenida y me apoyaron en mis primeros días en Ensenada.

A mi primer grupo de estudio en el CICESE en el curso propedéutico: Marcial, Russel, Adolfo, Joel Márquez y Alberto.

A mi malograda "clica" y grupo de estudio en el año de clases: Eli, Carlos, Fabián y Edgar.

A mi director de tesis, Dr. Jaime Sánchez García quien me dio la oportunidad de trabajar en una tesis interesante la cual representó un reto para mí. Gracias también por sus charlas y comentarios.

A los miembros de mi comité de tesis Dr. Luis Villaseñor, Dr. José Gallardo, Dra. Ewa Glowaca y M.C. Moisés Castro, por sus aportaciones y observaciones en el desarrollo de mi tesis.

A Ernesto Arteaga por compartir sus conocimientos y por su colaboración en el desarrollo del proyecto. Gracias además por su entusiasmo en el trabajo.

Al Ing. Rene Torres por todas sus atenciones durante mi trabajo en el laboratorio de electrónica del CICESE.

A mis múltiples compañeros de casa: Joel Márquez y Alberto, Caro y Néstor, Yanni y Vanesa, y a Brenda por compartir su casa en los últimos meses de mi estancia en Ensenada. También a Javier Cuadras, por prestarme su casa por unos días en diciembre del 2004.

A mis vecinos en el Sauzal: Joel Ruiz, Erica y Adolfo por todas sus atenciones.

A las almas caritativas del CICESE que en algún momento me dieron "rayte", pero en especial a Edgar, Carlos, Joel Ruiz, Joel Márquez y Vanesa.

A Joel Marquez y Ramón Muraoka por sus consejos y recomendaciones.

A mis compañeros de generación de los que me llevo buenos recuerdos.

A las secretarias Laura, Aurora y Rossy y demás personal del CICESE por todas sus atenciones.

A mi familia por todo el apoyo otorgado durante estos dos largos años lejos de casa. A mi novio Pepe y a su familia que estuvieron al pendiente de mi vida en Ensenada.

A mis amigos del DF: Ara, Angy, Juan Carlos, Asael, Néstor, Enrique y Galois por sus mensajes de apoyo por el chat o el celular.

Y finalmente, gracias a Dios por darme vida y salud para cerrar hoy otro ciclo en mi vida.

Contenido

Resumen	
Dedicatoria	
Agradecimientos	
Contenido.....	i
Lista de figuras	iii
Lista de tablas.....	iv
Capítulo I. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Organización de la tesis.....	4
Capítulo II. Consideraciones en el diseño de la red inalámbrica de sensores de área amplia.....	6
2.1 Introducción	6
2.2 Características de los nodos de la red.....	6
2.3 Requisitos de diseño de la red	7
2.4 Arquitectura de la red	8
2.5 Aspectos de propagación	9
2.6 Escenario de la red.....	11
Capítulo III. Diseño del nodo sensor.....	13
3.1 Introducción	13
3.2 Fuente de energía	14
3.3 Sensores y tarjeta de adquisición.....	16
3.4 Comunicación inalámbrica.....	18
3.4.1 Tarjeta de comunicación inalámbrica.....	18
3.4.2 Tecnología de radiofrecuencia	21
3.4.3 Antenas.....	23
3.5 Control lógico.....	25
3.5.1 Microcontrolador.....	25
3.6 Conectores	28
3.7 Interfaz prototipo	28
3.8 Demanda de energía	28
Capítulo IV. Operación del nodo sensor	32
4.1 Introducción	32
4.2 Comunicación ad hoc.....	32
4.3 Opciones de comunicación de radiofrecuencia de la tarjeta AC4790.....	35
4.4 Algoritmo principal	36
4.5 Paquetes usados para implementar el algoritmo de enrutamiento.....	41
4.6 Herramientas de programación.....	42

Capítulo V. Operación del nodo de acceso	44
5.1 Introducción	44
5.2 Hardware.....	44
5.3 Software.....	45
5.3.1 Programa de control y de recolección de datos	46
5.3.2 Página electrónica	50
Capítulo VI. Conclusiones.....	53
6.1 Conclusión	53
6.2 Trabajo futuro.....	54
Referencias.....	56
Apéndice A. Protocolo alternativo de enrutamiento para el sistema diseñado.....	58
A.1 El algoritmo M-a-1.....	58
A.2 Integración del algoritmo M-a-1 al sistema diseñado.	61

Lista de figuras

Figura 1. Arquitectura de la red inalámbrica de sensores de área amplia.....	9
Figura 2. Red de deformaciones del Valle de Mexicali. Ubicación de los nodos de la red.....	12
Figura 3. Nodo original de la RDEFVM. Se observa el panel solar, la tarjeta de adquisición a la izquierda y el sensor justo detrás del panel solar, ambos enterrados.....	14
Figura 4. Diagrama a bloques del nodo sensor.....	15
Figura 5. Principio de operación de la tecnología FHSS.	23
Figura 6. Selección de un dispositivo efectuada por el microcontrolador.....	27
Figura 7. Diagrama de la interfaz inalámbrica.	30
Figura 8. Prototipo de la interfaz inalámbrica.	31
Figura 9. Diagrama de flujo del programa principal implementado en el microcontrolador PIC18LF452.....	37
Figura 10. Paquetes usados para implementar el algoritmo de enrutamiento en el sistema.	43
Figura 11. Tarjeta de varios puertos de Aerocomm.	45
Figura 12. Diagrama de flujo del programa del nodo de acceso.....	47
Figura 13. Programa de control y recolección de datos. Ventana de descarga manual.....	48
Figura 14. Programa de control y recolección de datos. Ventana de configuración.	49
Figura 15. Página electrónica para el acceso remoto a la red.	52

Lista de tablas

Tabla I. Instrucciones para la descarga de datos de la tarjeta de adquisición.	17
Tabla II. Características generales de la tarjeta AC4790 de Aerocomm.	21
Tabla III. Demanda de energía de los dispositivos de la interfaz inalámbrica.	31

Capítulo I

Introducción

1.1 Antecedentes

En los últimos años, con el avance en materia de circuitos integrados de comunicaciones y radiofrecuencia, se han generado nuevas tecnologías inalámbricas. Las redes inalámbricas de sensores representan hoy en día una de las tecnologías más novedosas. En general, este tipo de redes consiste de un cierto número de nodos provistos de algún tipo de sensor que se encuentran distribuidos en un área y que se utilizan para recolectar y procesar datos (Agrawal et al. 2005).

Estas redes facilitan la recolección de datos en áreas de difícil o costoso acceso, por lo que son muchas las aplicaciones que han surgido en torno a ellas, incluidas las aplicaciones militares y las de monitoreo del medio ambiente (Akyildiz et al. 2002). Aunque las aplicaciones son distintas, los *nodos sensores* que se utilizan para formar estas redes tienen características similares: son de tamaño pequeño,

incluyen un transmisor-receptor, un microprocesador y uno o varios tipos de sensores; están limitados en energía¹, potencia de transmisión y en capacidad de memoria y de procesamiento (Haenggi, 2005). Debido a que sus dimensiones son de pocos centímetros, los nodos sensores pueden ser esparcidos en las áreas de interés de manera sencilla y sin requisitos estrictos de instalación.

La limitada potencia de transmisión, reduce el radio de cobertura de un nodo sensor a algunos metros. Sin embargo, el radio de cobertura de una red formada por varios de estos nodos puede ampliarse considerablemente ya que los nodos pueden comunicarse formando una red *ad hoc*, en la cual los datos son enviados de un nodo fuente a un nodo de destino a través de nodos intermedios.

Existen sistemas comerciales de comunicación inalámbricos desarrollados bajo el estándar para redes de sensores 802.15.4 (IEEE 802.15.4 2003), que brindan cobertura de área personal, lo que funciona en aplicaciones en donde los nodos están esparcidos en un área pequeña. El problema surge cuando se requiere dar cobertura en un nivel urbano o mayor, en donde los nodos están separados por grandes distancias, y para formar la topología de red *ad hoc* requieren transmitir con suficiente potencia para alcanzar sus nodos vecinos, lo cual no es posible si se usan sistemas comerciales para redes de sensores debido a que éstos transmiten con poca potencia (algunos dBm).

¹ Su tiempo de vida depende de las baterías de las que se alimenta. Regularmente se usan baterías AA con las que podrían trabajar incluso por varios años dependiendo de la tecnología implementada en el nodo sensor.

En particular, la *Red de deformaciones del valle de Mexicali* RDEFVM del departamento de sismología del CICESE, presenta un escenario en el que los nodos se encuentran separados varios kilómetros. La recolección de los datos generados por los nodos se hace manualmente mediante visitas mensuales lo que origina un retraso en el análisis de los datos adquiridos, e implica un costo económico y físico si se considera la alta temperatura que puede alcanzar el valle (de 40 a 50 C°). La recolección remota de los datos mediante una red inalámbrica evitaría dichos inconvenientes, con beneficio a los investigadores encargados de la RDEFVM.

1.2 Objetivos

En esta tesis se presenta el diseño e implementación de un sistema de comunicación inalámbrico específico para una red de sensores de área amplia capaz de establecer la comunicación en forma *ad hoc*. Se utilizan tarjetas inalámbricas que transmiten con gran potencia a las que se agrega la capacidad de establecer la comunicación en forma *ad hoc* mediante un algoritmo de enrutamiento programado en un microcontrolador. El sistema está diseñado para interactuar con una tarjeta de adquisición de datos y se considera un panel solar para alimentar el sistema. Asimismo, se desarrolla una interfaz gráfica necesaria para el control y recolección de los datos, y una página WEB para la recolección remota de los datos a través de Internet.

1.3 Organización de la tesis.

En el capítulo 2 se presentan las consideraciones hechas para el diseño de la red inalámbrica de sensores de área amplia. Se mencionan las características de los nodos, la arquitectura de red empleada y se mencionan algunos aspectos que afectan el desempeño de un sistema de comunicaciones inalámbrico así como las técnicas para contrarrestar dichos efectos. Al final del capítulo se muestra el escenario de la red.

En el capítulo 3 se presenta el diseño del *nodo sensor* así como los componentes electrónicos elegidos para su implementación; se mencionan también las características de los dispositivos para la comunicación inalámbrica (transmisor-receptor y antena). Por último, se presentan las características del microcontrolador en el que se implementa el algoritmo que proporciona comunicación *ad hoc* a la red.

En el capítulo 4 se describen las funciones que desempeña el nodo sensor. Se presenta el algoritmo para establecer la comunicación *ad hoc* y para interactuar con la tarjeta de adquisición. Se describen los paquetes de datos que usa la red y finalmente se mencionan las herramientas de programación empleadas para la implementación del algoritmo en el microcontrolador.

En el capítulo 5 se describe la operación del nodo de acceso. Se presenta el programa de control y recolección de datos diseñado para el manejo de la red, así

como la página electrónica para acceder remotamente a la red vía Internet.
Finalmente en el capítulo 6 se presentan las conclusiones de esta tesis.

Capítulo II.

Consideraciones en el diseño de la red inalámbrica de sensores de área amplia

2.1 Introducción

En este capítulo se mencionan los requisitos de diseño de la red inalámbrica de sensores de área amplia y las características de los nodos que la integran. Se describen la arquitectura de red empleada y algunos aspectos de propagación importantes. Finalmente, se presenta el escenario de la red.

2.2 Características de los nodos de la red

En principio, el sistema a diseñar intenta dar solución al problema de recolección de datos que presenta la *Red de deformaciones del valle de Mexicali* por lo que se consideran en el diseño las características de los nodos que la integran .

La *red de deformaciones del valle de Mexicali* RDEFVM del departamento de sismología de CICESE está integrada por diferentes tipos de sensores: dos grietómetros, siete inclinómetros (tres de pozo) y un termómetro digital. La red

inalámbrica, en un principio, sólo incluirá los sensores de desplazamiento, llamados inclinómetros. Por tanto, originalmente cada nodo de la red cuenta con un inclinómetro, una tarjeta de adquisición de datos y una celda solar de 20 W de potencia que provee energía al nodo. El sensor está conectado a una tarjeta de adquisición, misma que se encarga de obtener y guardar los datos generados por el sensor. Los investigadores recolectan los datos de la tarjeta de adquisición conectando una computadora personal a través del puerto serie.

Para dar comunicación inalámbrica a la RDEFVM, se debe considerar que cada nodo está ubicado en un lugar estratégico para el estudio de las deformaciones de la corteza terrestre, por lo que los nodos no pueden cambiarse de lugar para acortar la distancia entre ellos; y además, las características requeridas por la aplicación, tanto en los sensores como en la tarjeta de adquisición, hacen necesario conservar la estructura de cada nodo de la RDEFVM.

2.3 Requisitos de diseño de la red

Para tener acceso a la red desde un dispositivo remoto a través de Internet, al menos uno de los nodos que integran la red debe contar con una conexión a Internet. Es necesario también el diseño de una interfaz gráfica de usuario para el control remoto de la red que permita la recolección manual y automática de los datos captados en los nodos.

Por otro lado, para dar a la red cobertura amplia, se requiere agregar a cada nodo un transmisor de gran potencia y una antena de alta ganancia. Asimismo, para establecer la comunicación *ad hoc* en la red, se requiere agregar un microcontrolador con un algoritmo de enrutamiento previamente grabado en memoria. La energía para alimentar estos dispositivos la proporciona la celda solar con la que cuenta cada nodo.

2.4 Arquitectura de la red

La arquitectura de la red consiste de los nodos sensores, un nodo de acceso, un servidor de páginas WEB y una terminal remota.

Los nodos sensores forman el nivel básico de la arquitectura del sistema. Un nodo sensor desempeña funciones de red además de las funciones de sensado, ya que procesa y envía los datos generados por los sensores a través de la red al nodo de acceso.

El nodo de acceso es responsable de recolectar y transmitir la información de los nodos sensores a una terminal remota a través de Internet. El nodo de acceso es una computadora personal que se comunica de forma inalámbrica con los nodos sensor y cuenta con software diseñado para la recolección de los datos.

El servidor de páginas WEB aloja la página electrónica necesaria para tener acceso remoto a la red a través de Internet. Por simplicidad, dicho servidor se instalará en el nodo de acceso.

Por último, la terminal remota es cualquier computadora personal que tenga acceso a Internet. El usuario debe contar con una clave de acceso al sistema para poder consultar los datos de la red o cambiar la configuración. La figura 1 muestra la arquitectura de red descrita anteriormente.

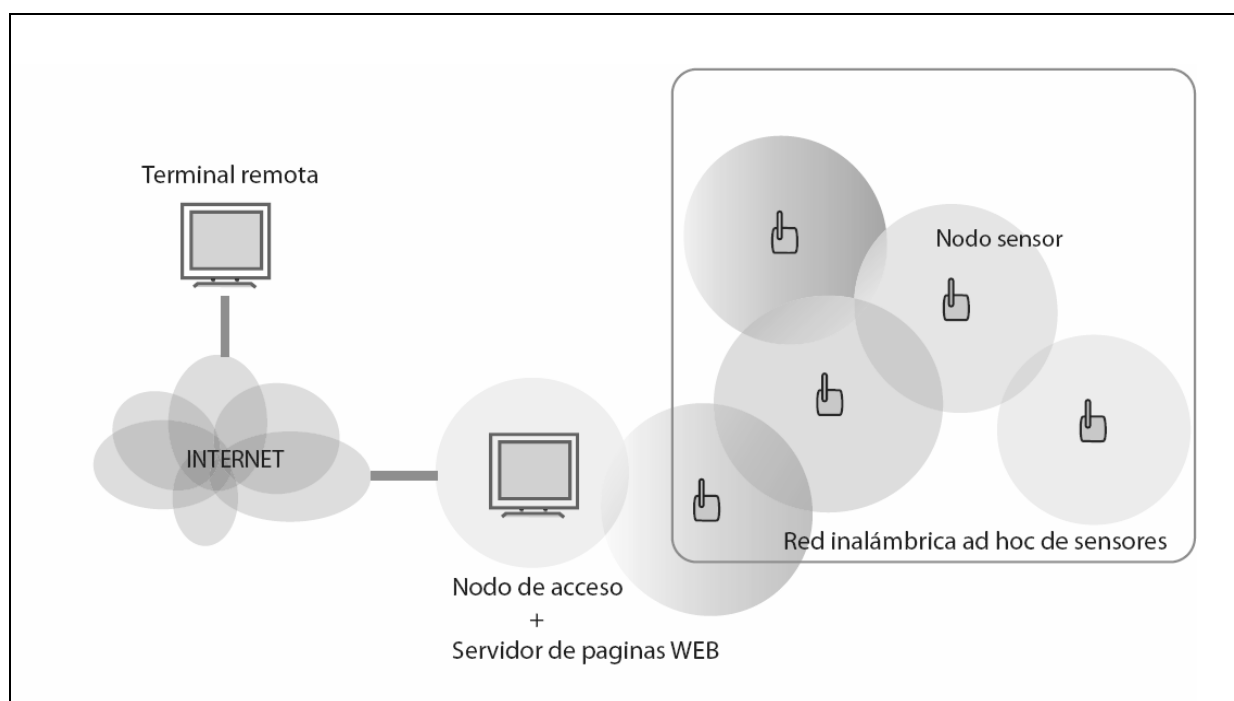


Figura 1. Arquitectura de la red inalámbrica de sensores de área amplia

2.5 Aspectos de propagación

El desempeño de un sistema de comunicaciones inalámbrico es fuertemente afectado por el medio de propagación. Una señal transmitida sufre múltiples

reflexiones debidas a obstáculos en el medio, lo que ocasiona que la señal viaje por diferentes trayectorias de longitudes distintas. La interacción de estas múltiples trayectorias ocasiona desvanecimientos por *multitrayectorias*. Así mismo, fenómenos como la difracción y la dispersión causan desvanecimientos en la señal. Por otro lado, la potencia de una señal disminuye al aumentar la distancia entre el transmisor y el receptor (Prasad 1998).

Existen varias técnicas para contrarrestar los efectos del medio como son: la ecualización, la diversidad y la codificación del canal, entre otras. A grandes rasgos, la ecualización permite al receptor contrarrestar la interferencia intersímbolo generada en el ambiente de *multitrayectorias*, por lo que un ecualizador debe adaptarse a las características del canal. La diversidad es una técnica para contrarrestar los desvanecimientos de la señal y se implementa usando varias antenas en el receptor. La codificación del canal contrarresta los desvanecimientos instantáneos que puede sufrir una señal y consiste en agregar bits de redundancia al mensaje enviado de tal forma que el receptor puede recuperar los datos a pesar de que dichos desvanecimientos causen errores en los bits recibidos (Rappaport 2002).

En un sistema inalámbrico debe incluirse alguna de estas técnicas para robustecer el sistema. En el sistema diseñado se usa la codificación de canal además de una modulación de espectro esparcido que presenta inmunidad a la interferencia y alta resistencia ante los desvanecimientos por *multitrayectorias*.

2.6 Escenario de la red

Los nodos de la RDEFVM se encuentran ubicados dentro de un área aproximada de 280 Km² como se muestra en la figura 2. La red inalámbrica de sensores, en un principio, sólo incluirá los 7 inclinómetros que se observan, y cada uno de ellos representará un nodo sensor de la red. Los nodos se encuentran separados en promedio 4 Km, siendo el nodo más alejado el ubicado en la falla Imperial. Cada uno de los nodos de la red inalámbrica de sensores, deberá establecer enlaces de largo alcance con sus nodos vecinos para enviar sus datos al nodo de acceso. Se tiene contemplado colocar el nodo de acceso en el Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California, ubicado en el ejido Nuevo León, mismo que se indica por medio de un recuadro en la figura 2.

Una vez que el sistema esté diseñado, se evaluará su desempeño por medio de varios nodos sensores colocados dentro del campus del CICESE y se realizarán descargas de datos de algunos de estos nodos empleando la topología *ad hoc* y la interfaz gráfica diseñada. Si el desempeño de la red dentro del campus es favorable, el diseño se dará por terminado y posteriormente, el sistema podrá ser evaluado bajo condiciones reales en el valle de Mexicali por parte de los usuarios de la RDEFVM.

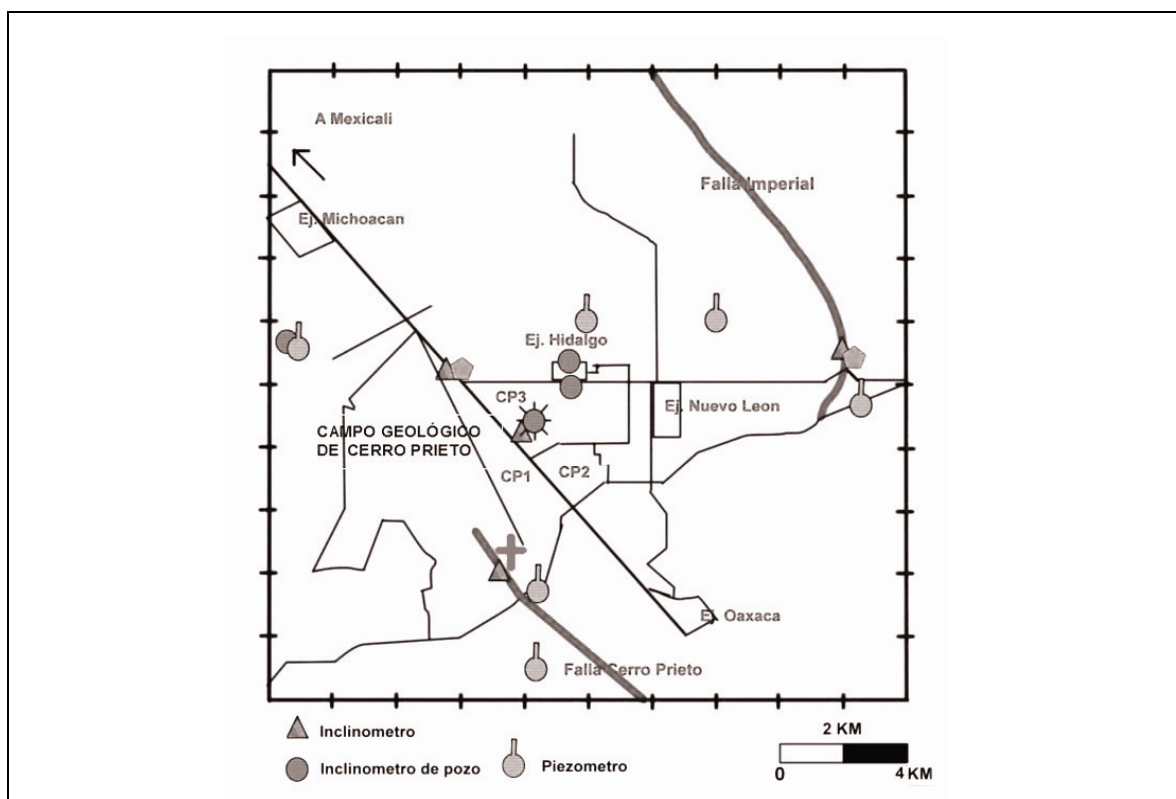


Figura 2. Red de deformaciones del Valle de Mexicali. Ubicación de los nodos de la red.

Capítulo III

Diseño del nodo sensor

3.1 Introducción

Originalmente los nodos de la RDEFVM cuentan con un sensor, una tarjeta de adquisición y una batería que se recarga con un panel solar (figura 3). En este capítulo se presenta el diseño del circuito electrónico que debe agregarse a cada nodo para establecer la comunicación inalámbrica en la red. El circuito electrónico se puede dividir en dos bloques: uno representa la comunicación inalámbrica y el otro el control lógico. En la figura 4 se muestra el diagrama a bloques del *nodo sensor*, nombre que se le da al nodo original de la RDEFVM una vez que se agrega el circuito electrónico para la comunicación inalámbrica. En los siguientes párrafos se explica cada bloque del diagrama, se presentan los componentes electrónicos elegidos para la implementación de cada bloque y se discuten algunas sugerencias para el reemplazo de algunos componentes. En lo sucesivo, al circuito electrónico agregado se le llamará *interfaz inalámbrica*.



Figura 3. Nodo original de la RDEFVM. Se observa el panel solar, la tarjeta de adquisición a la izquierda y el sensor justo detrás del panel solar, ambos enterrados.

3.2 Fuente de energía

Cada nodo de la RDEFVM cuenta con un panel solar BP SX20 que proporciona 20 W de potencia máxima. Los sensores y una fuente recargable de 12 V toman energía directamente del panel solar mientras que la tarjeta de adquisición toma energía de la fuente de 12 V.

El control lógico así como la tarjeta inalámbrica trabajan con niveles lógicos LVTTTL (señal TTL de bajo voltaje) por lo que es necesaria una conversión de voltaje de 12 V a 3.3 V. Por otro lado, la tarjeta inalámbrica requiere de 1.5 A para transmitir a su máxima potencia de 1 W, por lo que a la salida de la conversión de voltaje se debe asegurar al menos una corriente de 1.5 A; de otra forma, la tarjeta

inalámbrica transmitirá con menor potencia, lo que repercute en el alcance de la señal de radiofrecuencia.

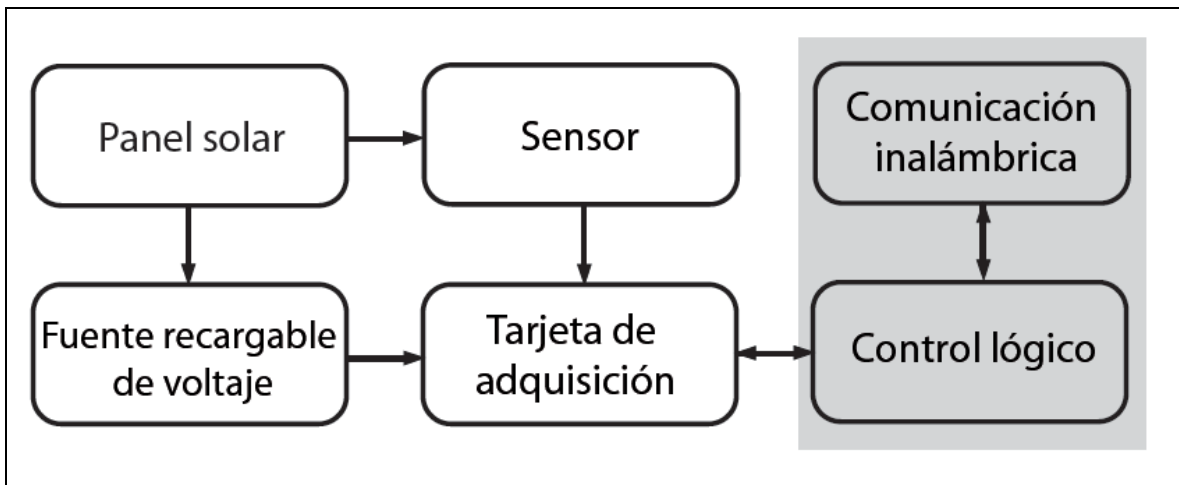


Figura 4. Diagrama a bloques del nodo sensor.

La conversión de voltaje se hace en dos etapas debido a que comercialmente no se cuenta con dispositivos que hagan la conversión directa de 12 V a 3.3 V con la corriente de salida requerida. En la primera etapa el voltaje se convierte de 12 V a 5 V @ 1.5 A, y en la segunda etapa se convierte de 5 V a 3.3 V @ 1.5 A. La primera etapa se lleva a cabo con un convertidor lineal de voltaje de Texas Instruments, el UA7805. El rango de voltaje de entrada es de 7 V a 25 V con corriente de salida de 1.5 A y con voltaje de salida de 5 V. El empaque del UA7805 es un KTE que permite una mejor disipación de potencia comparado con otros

empaques; esto previene que el dispositivo deje de funcionar por exceso de temperatura. Para mejorar la disipación de potencia del dispositivo, se crea un disipador en el PCB que consiste en un área de cobre sobre la cual se soldará el dispositivo. La segunda etapa de conversión se lleva a cabo con un convertidor lineal de voltaje LDO de Texas Instruments en empaque KTE, el TPS78633. El rango de voltaje de entrada es de 2.7 V a 5.5 V, corriente de salida de 1.5 A y voltaje de salida de 3.3 V.

3.3 Sensores y tarjeta de adquisición

Los sensores utilizados por la RDEFVM son inclinómetros que miden el hundimiento de la tierra. Cada sensor está conectado a una tarjeta de adquisición de datos CR10X de la compañía Campbell Scientific (Campbell Scientific 1997). Para conectar la CR10X con un dispositivo externo que cuente con un puerto serie, se utiliza una interfaz SC32A de la misma compañía; la velocidad máxima de transmisión de la tarjeta es de 76.8 Kbps. Para hacer una descarga de datos, se requiere iniciar una sesión con la tarjeta, establecer la velocidad de transmisión que ha de usarse, e introducir algunas instrucciones. La tarjeta da por terminada la sesión automáticamente después de 40 s sin recibir peticiones.

La memoria de la tarjeta de adquisición está organizada en forma circular, por lo que al alcanzar su capacidad máxima, los datos son guardados nuevamente al

inicio de la memoria. Cuando esto ocurre, los datos se sobrescriben, por lo que es necesario hacer una descarga mensual para evitar la pérdida de información.

La tarjeta cuenta con dos apuntadores de memoria, el DSP y el MPTR. El DSP avanza conforme se van ocupando las localidades de memoria con los datos generados por el sensor. El MPTR se usa para indicar la localidad de memoria a partir de la cual el usuario requiere hacer una descarga de datos. Por tanto, para hacer una descarga, se requiere conocer la posición del DSP, colocar el MPTR en la localidad en la cual se hizo la última descarga y descargar los arreglos de datos uno a uno hasta llegar a la ubicación del DSP. Cada arreglo de datos se compone de 97 bytes.

Las instrucciones requeridas para obtener los datos guardados en la tarjeta de adquisición se presentan en la tabla 1.

Tabla I. Instrucciones para la descarga de datos de la tarjeta de adquisición.

Instrucción	Descripción
A	Despliega: ubicación del apuntador DSP, versión de la tarjeta de adquisición, área de la memoria, ubicación del apuntador MPTR, errores, memoria total, batería, checksum.
[no. de arreglos]D	Descarga el número especificado de arreglos de datos en formato ASCII.
[no. localidad]G	Mueve el apuntador MPTR a la localidad de memoria especificada.

3.4 Comunicación inalámbrica

Comercialmente se cuenta con una amplia gama de tarjetas que proporcionan comunicación inalámbrica para aplicaciones de redes de sensores. Son varias las compañías que ofrecen tarjetas que trabajan bajo el estándar IEEE 802.15.4, entre ellas Chipcon (Chipcon 2006), Crossbow (Crossbow 2006) y Dust Networks (Dust Networks 2006). Las compañías citadas incluyen en sus tarjetas un transmisor-receptor de baja potencia (de algunos dBm), un microprocesador, una antena y varios tipos de sensores, e. g. sensores de temperatura, presión, humedad, entre otros. Por otro lado, hay compañías que ofrecen tarjetas que transmiten con gran potencia (hasta 1 W) y que cuentan con interfaces, como USB o RS232, para conectar dispositivos a los que se desee agregar comunicación inalámbrica. Compañías como Microhard Systems (Microhard Systems 2006), Aerocomm (Aerocomm 2006) y Maxstream (Maxstream 2006) ofrecen tarjetas de este tipo. Cabe mencionar que estas tarjetas están limitadas a trabajar en topologías de tipo punto a punto, punto a multipunto y estrella.

3.4.1 Tarjeta de comunicación inalámbrica

En la red, cada nodo sensor requiere de una tarjeta de comunicación inalámbrica para interactuar con otros nodos. Debido a que los nodos están separados por distancias medidas en kilómetros, se requiere de una tarjeta de gran potencia para que la señal emitida logre llegar a algún nodo vecino.

La tarjeta inalámbrica con la que está diseñada la red es la AC4790 de la compañía Aerocomm. En los siguientes párrafos se presentan sus principales características.

La tarjeta AC4790 trabaja en la banda industrial, científica y médica ICM, la cual es una banda reservada internacionalmente de uso libre para comunicaciones de radiofrecuencia en aplicaciones no comerciales en los ámbitos médico, científico e industrial. En México, el uso de la banda ICM está definido en el Diario Oficial de la Federación.

La frecuencia central de operación es de 900 MHz. Comparada con la frecuencia ICM de 2.4 GHz, la frecuencia de 900 MHz ocasiona menos pérdidas por propagación, de acuerdo a la ecuación de pérdidas por propagación en el espacio libre presentada en (Rappaport 2002),

$$P_L = \frac{(4\pi)^2 d^2}{\lambda^2} \quad (1)$$

donde λ es la longitud de onda y d es la distancia entre transmisor y receptor. Esto permite que el radio de cobertura sea mayor comparado con una tarjeta que opera en la banda de 2.4 GHz.

La potencia de transmisión es ajustable, desde 5 mW hasta 1000 mW, por lo que la tarjeta AC4790 puede trabajar dentro del límite máximo de potencia de transmisión para una banda ICM, que se establece de 1 W. Esta característica es atractiva en situaciones en que, dependiendo de la posición de los nodos en la red, se requiera ajustar la potencia de transmisión para alcanzar un nodo vecino.

Desafortunadamente, no cuenta con un modo de "dormir" que permita ahorrar energía cuando la tarjeta está inactiva. A la máxima potencia, el fabricante especifica un radio de cobertura de 32 Km en espacios exteriores con visibilidad directa. Desde luego que esta cobertura disminuye conforme se presentan obstáculos entre el transmisor y el receptor.

Esta tarjeta cuenta con una interfaz RS232, con la cual se conecta al microcontrolador que se encarga de la operación de cada nodo. La velocidad de transmisión puede ser desde 1.2 Kbps hasta 115.2 Kbps, sin embargo, la velocidad máxima de transmisión del sistema está limitada por la velocidad de transmisión de la tarjeta de adquisición, cuya tasa máxima es de 76.8 Kbps. En un principio, se usará una velocidad de transmisión de 9.6 Kbps para probar el desempeño del sistema. Si la calidad del enlace lo permite, el sistema podrá configurarse con una velocidad de transmisión mayor.

Por último, la tarjeta AC4790 cuenta con una memoria EEPROM de 256 bytes en donde se pueden configurar sus parámetros de operación como son: la potencia de transmisión, el número máximo de retransmisiones, la velocidad de transmisión del puerto serie, entre otros.

Un resumen de las características principales de la tarjeta AC4790 se presenta en la tabla 2.

Tabla II. Características generales de la tarjeta AC4790 de Aerocomm.

Características	
Interfaz	Mini conector de 20 patitas
Banda de frecuencia ICM	902-928 MHz
Tecnología de RF	FHSS
Modulación	FSK
Interfaz serie	RS-232
Velocidad de transmisión de la interfaz serie	1.2 -115.2 Kbps
Tamaño de buffer	256 bytes
Voltaje lógico	LVTTTL
Antena	Conector MMCX para antena externa
Canales	3 conjuntos de canales, con un total de 56 canales
Seguridad	Un byte para clave de sistema
Consumo de corriente	765 mA @ 1000 mW
Potencia de salida	5 mW – 1000mW
Fuente de voltaje	Pin 10: 3.3 – 5.5V \pm 50 mV Pin 11: 3.3 \pm 3%, \pm 100 mV
Sensibilidad	-99 dBm @ 76.8 Kbps
Alcance (con antena de 3 dBi y visibilidad directa)	32 Km.
Condiciones ambientales	
Temperatura	-40°C a 80°C
Humedad	10% a 90%
Dimensiones	49 x 42 x 5 mm
Peso	< 21 g

3.4.2 Tecnología de radiofrecuencia

Una señal requiere de un proceso de adaptación para poder ser transmitida a través del medio inalámbrico. La modulación es un proceso que se emplea para

ello. En general, la modulación consiste en “mover” una señal de banda base a una banda mucho mayor. Las técnicas de modulación que se emplean en los sistemas de comunicaciones pueden clasificarse en dos grupos. Por un lado, están las técnicas de banda angosta, que tratan de usar de forma eficiente el ancho de banda, e. g. QPSK, FSK, QAM, entre otras; y por otro lado, están las técnicas de modulación de espectro esparcido que emplean un ancho de banda mucho mayor al mínimo requerido para la transmisión de una señal.

Las técnicas de modulación de espectro extendido se caracterizan por su alta inmunidad a la interferencia y la alta resistencia que presentan ante los desvanecimientos por multitrayectorias. Las dos técnicas más representativas son DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) y FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum).

En FHSS la frecuencia central de transmisión “salta” de una frecuencia a otra de acuerdo a una secuencia pseudoaleatoria, conocida sólo por el transmisor y el receptor. Los saltos ocurren dentro de una banda de frecuencias que incluye un número determinado de canales, donde cada canal representa una frecuencia central y un ancho de banda suficiente para incluir el espectro en potencia de una modulación de banda angosta, generalmente FSK. En cada salto, se transmite una ráfaga de datos modulados; la cantidad de datos transmitidos o recibidos en cada salto depende de la duración del salto (Rappaport 2002). La figura 5 muestra el funcionamiento básico de FHSS.

La tarjeta AC4790 emplea FHSS como técnica de modulación. Cuenta con un total de 56 canales para efectuar los saltos. Cada salto tiene una duración de 50 ms y pueden enviarse 128 bytes en cada uno de ellos. Todas las tarjetas de comunicación inalámbrica que formen parte de una misma red, deben elegir la misma banda de frecuencia para comunicarse entre ellas.

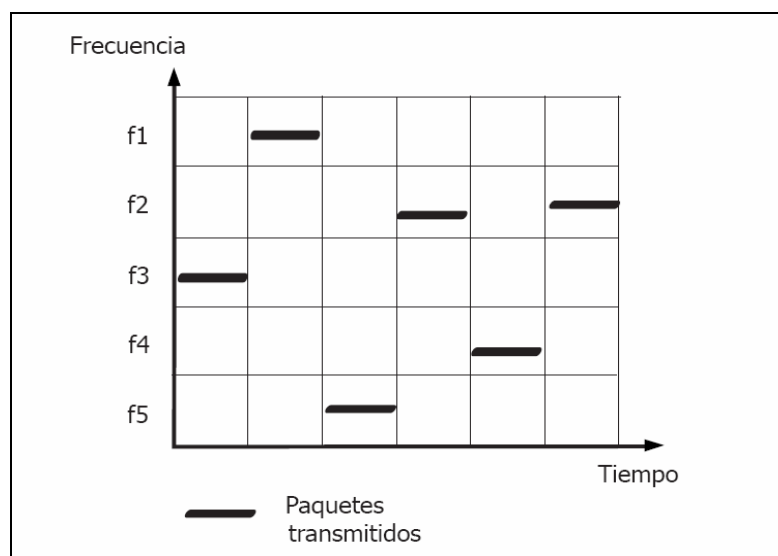


Figura 5. Principio de operación de la tecnología FHSS.

3.4.3 Antenas

Una antena es un dispositivo usado para enviar o recibir ondas electromagnéticas. Existen varios parámetros que deben considerarse en el momento de elegir una antena para un sistema determinado. En un sistema de comunicaciones, la

ganancia, polarización y ancho de banda en la que opera, son los parámetros más importantes que afectan el desempeño del sistema (Wolf 1988). Así mismo, también deben considerarse la potencia de transmisión y la frecuencia de operación ya que son aspectos que influyen en la propagación en el medio de las ondas radiadas. Por otra parte, factores como la ubicación de la antena con respecto a la tierra, si hay o no visibilidad directa, pueden ocasionar pérdidas por propagación por lo que es importante analizar el ambiente en el que se instalará la antena.

El objetivo de analizar una antena es determinar sus características de radiación, ya que cada tipo de antena tiene diferente distribución de carga y diferente geometría. Un alambre cuya longitud sea proporcional a la longitud de onda y que se alimente con voltaje en su centro, es conocido como un dipolo magnético. El dipolo magnético de media longitud de onda se considera una antena omnidireccional, es decir, su patrón de radiación presenta una misma amplitud en cualquier dirección con respecto a un plano que pasa a través de la antena. Su directividad es $D=1.64$ (Wolff 1988).

La ganancia de la antena puede calcularse por medio de la directividad, si se conoce la eficiencia η de la antena:

$$G = \eta \cdot D \quad (2)$$

En el mejor de los casos, la eficiencia de una antena es del 100% por lo que la ganancia máxima de un dipolo magnético es $G = 1.64$ o expresado en dB $G = 2.15 \text{ dB}$.

En el sistema que nos ocupa, es necesario que la antena sea omnidireccional y que cuente con alta ganancia que permita incrementar el radio de cobertura. Por ello se eligió una antena de tipo dipolo magnético de $\frac{1}{2}$ longitud de onda con ganancia de 2 dBi y frecuencia de operación de 900MHz. El conector es un MMCX, compatible con la tarjeta AC4790. Esta antena puede ser sustituida por cualquier otra antena de mayor ganancia siempre y cuando sea omnidireccional.

3.5 Control lógico

Debido a que las tarjetas inalámbricas con las que se trabaja no cuentan con la capacidad de establecer la comunicación *ad hoc* en la red, es necesario integrar en cada nodo sensor un microcontrolador que se encargue de ello.

3.5.1 Microcontrolador

Un microcontrolador con un programa previamente grabado en memoria se encarga de la operación total del nodo sensor. Entre sus tareas están la comunicación con la tarjeta inalámbrica y la comunicación con la tarjeta de adquisición para la recolección de los datos generados por los sensores.

El microcontrolador usado en la red es el PIC18LF452 de la compañía Microchip. Tiene capacidad de almacenar 16,384 palabras de programa en memoria flash, equivalente a 32 KBytes de memoria, y cuenta con una EPROM de 256 bytes. La frecuencia de oscilación puede ser de hasta 40 MHz, y se eligió la de 4 MHz para proveer la señal de reloj al sistema. Considerando que una instrucción requiere de 4 ciclos de reloj para ejecutarse, cada instrucción requerirá de 1 μ s.

Por otra parte, se requiere de pocos dispositivos externos para operar el microcontrolador, por lo que el consumo de energía del nodo no se incrementa en gran medida al incluirlo en el diseño y las proporciones físicas del nodo se mantienen pequeñas (12 x 12 cm).

El microcontrolador cuenta con una línea de transmisión TX y una línea de recepción RX. Debido a que es necesario establecer comunicación tanto con la tarjeta de adquisición como con la tarjeta inalámbrica, se requiere de un conmutador para elegir entre estos dos dispositivos. El microcontrolador elige el dispositivo con cual comunicarse por medio de un bit selector, el bit 0 del puerto B. Si el bit selector es 0, el microcontrolador usa las líneas Tx y Rx para comunicarse con la tarjeta inalámbrica; si el bit selector es 1, entonces usa dichas líneas para comunicarse con la tarjeta de adquisición. El SN74CBTLV3257 de Texas Instruments es un conmutador digital, mejor conocido como MUX/DEMUX, de 1 a 2 líneas de 4 bits, y es el dispositivo que se emplea para estos fines. En la figura 6 se muestra un diagrama a bloques de la conexión de estos tres dispositivos.

El microcontrolador PIC18LF452 fue elegido debido a su capacidad de memoria, porque en un principio no se conocía el tamaño del programa necesario para implementar la red. Sin embargo, puede usarse cualquier microcontrolador con capacidad de hasta 16 KBytes en memoria flash. Asimismo, un microcontrolador que maneje dos puertos serie eliminaría la necesidad del conmutador digital, aunque éstos requieren de más patas en el CI, generalmente 64. En esta aplicación se optó por el microcontrolador PIC18LF452 de 40 patas que cuenta con un solo puerto serie, ya que no se contaba con un programador de microcontroladores de más de 40 patas. Debido a ello, se optó por conmutar las señales en base a que la comunicación con la antena y la tarjeta de adquisición no se efectúan al mismo tiempo.

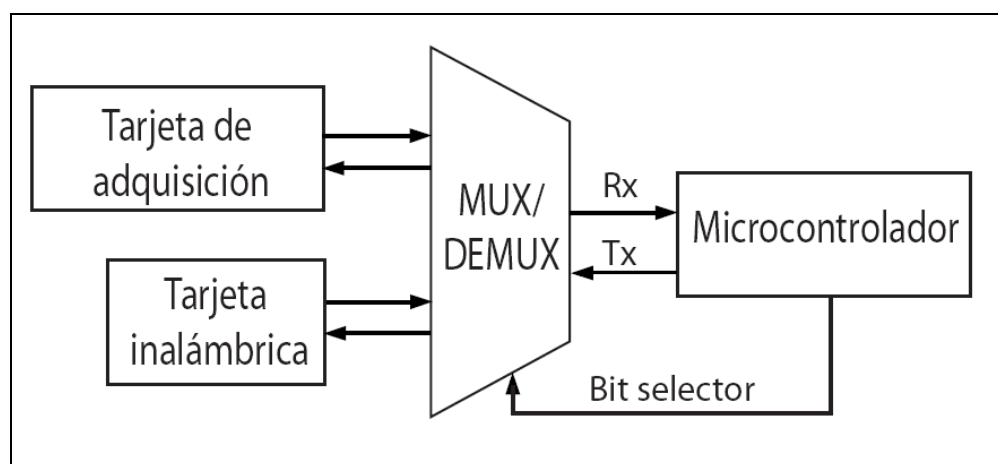


Figura 6. Selección de un dispositivo efectuada por el microcontrolador.

3.6 Conectores

La interfaz inalámbrica cuenta con un miniconector de 20 patas para conectar la tarjeta inalámbrica AC4790 y un conector DB9 para la comunicación con la tarjeta de adquisición. También cuenta con un interruptor para reinicio manual, además de LEDs que permiten monitorear el funcionamiento de la interfaz.

3.7 Interfaz prototipo

Para probar el diseño de la interfaz inalámbrica, se elaboró un prototipo en PCB con el programa EAGLE en una versión para estudiantes que permite el diseño de proyectos en un espacio de 12 x 12 cm. En la figura 7 se muestra el diagrama de la interfaz inalámbrica. El dispositivo MAX3222 se usa para convertir los niveles lógicos de la interfaz RS232 a niveles LVTTTL y viceversa, de manera que el microcontrolador pueda interactuar con el dispositivo conectado al puerto serie, en este caso, con la tarjeta de adquisición. El prototipo con la tarjeta inalámbrica, el microcontrolador, la antena y demás dispositivos se muestran en la figura 8.

3.8 Demanda de energía

Debido a que la tarjeta de comunicación inalámbrica en estado de transmisión es el dispositivo que más potencia requiere de la batería del nodo sensor, 2.3 W en promedio, se presenta el cálculo de consumo de potencia para dicho dispositivo. Como se mencionó anteriormente, el tiempo que requiere la tarjeta inalámbrica ya

sea para transmitir o recibir un paquete es de 50 ms. Por tanto la transmisión de un paquete requerirá en promedio de $2.3 \text{ W} * 50 \text{ ms}$, que equivale a 32×10^{-6} WH. Suponiendo que los sensores generen un dato cada minuto, al final del día cada tarjeta de adquisición tendrá 1440 datos nuevos. La transmisión de dichos datos al nodo de acceso requiere la transmisión de un paquete por cada dato. Por tanto, la descarga de los 1440 datos requerirá $1440 * (32 \times 10^{-6}) = 46 \times 10^{-3}$ WH. Por otro lado, si se considera también que cada nodo sirve como retransmisor de paquetes hacia otros nodos, la demanda de energía total puede calcularse multiplicando la energía calculada por el número de nodos vecinos. En promedio, el número de nodos vecinos es 3, por tanto la demanda de energía aproximada será de $3 * (46 \times 10^{-3}) = 138 \times 10^{-3}$ WH al día. La capacidad de la batería necesaria para el sistema se obtiene a partir del consumo promedio diario, dividiendo la demanda diaria entre 12 V, que es el voltaje de trabajo de la batería. El resultado arroja la capacidad aproximada de almacenamiento necesaria, en este caso $138 \times 10^{-3} / 12 = 11.5 \times 10^{-3}$ Ah. La batería que se recarga con la energía del panel solar tiene una capacidad de 7 Ah por lo que puede proporcionar la energía necesaria para las transmisiones aún si se consideran periodos de escasa recarga, como días nublados, nieblas persistentes, u otros aspectos climatológicos. En la tabla 3 se presenta la demanda de energía de los demás dispositivos de la interfaz inalámbrica agregada a cada nodo de la RDEFVM.

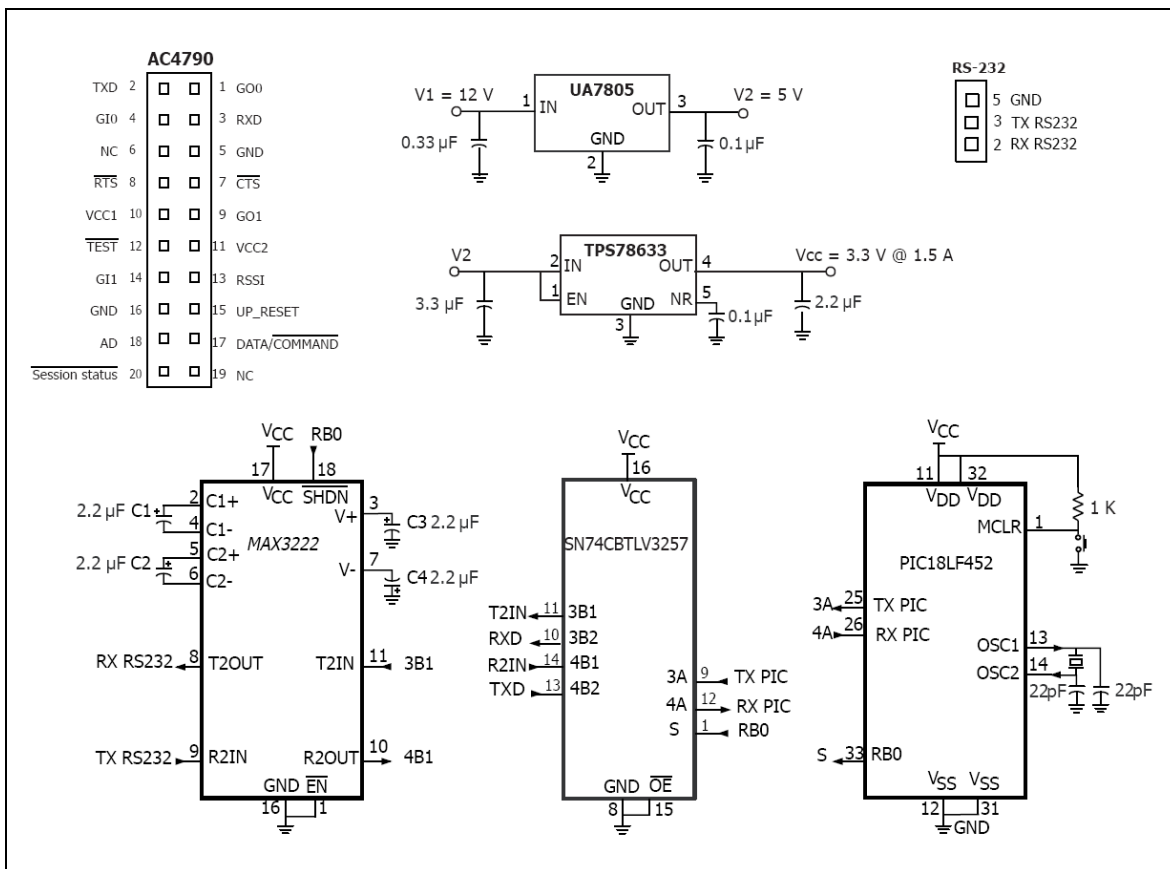


Figura 7. Diagrama de la interfaz inalámbrica.

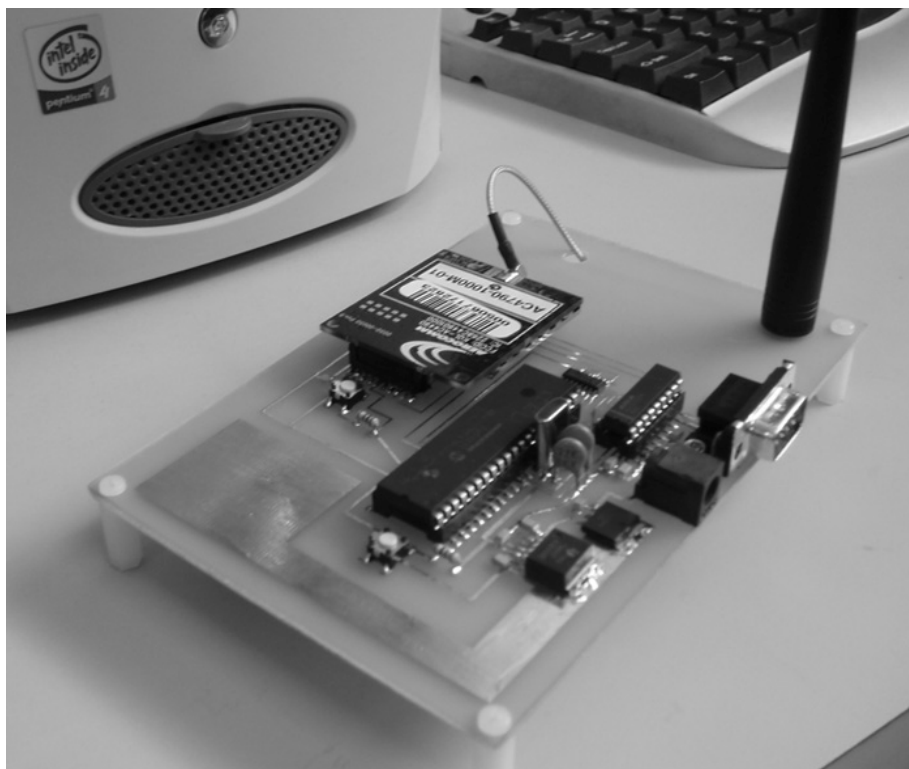


Figura 8. Prototipo de la interfaz inalámbrica.

Tabla III. Demanda de energía de los dispositivos de la interfaz inalámbrica.

Dispositivo	Voltaje (V)	Corriente	<i>Potencia (mW)</i>
PIC18LF452	3.3	1.25 mA	4.13
SN74CBTLV3257	3.3	610 μ A	2.01
MAX3222	3.3	1 mA	3.30
Potencia total			9.44

Capítulo IV

Operación del nodo sensor

4.1 Introducción

El nodo sensor desempeña funciones tanto de red como de sensor. Una de las funciones de red es establecer la comunicación *ad hoc*, mientras que una función de sensor es la interacción con la tarjeta de adquisición para extraer los datos generados por el sensor. En este capítulo se presenta el algoritmo necesario para el desarrollo de ambas funciones, mismo que fue grabado en la memoria del microcontrolador.

4.2 Comunicación ad hoc

En una red *ad hoc* los nodos envían paquetes de un nodo fuente a un nodo destino mediante nodos intermedios. Para lograr este tipo de comunicación entre los nodos, pueden usarse mecanismos de difusión o algoritmos de enrutamiento.

En los mecanismos de difusión, los paquetes son enviados desde un nodo de origen y son retransmitidos por los nodos vecinos hasta que eventualmente llegan

al nodo de destino. Dentro de los mecanismos de difusión se encuentran la "inundación" y la difusión por "rumores". En la "inundación" cada nodo revisa los paquetes que le llegan y si es el destino, procesa el paquete; en caso contrario, lo retransmite a todos sus vecinos, siempre y cuando el número de saltos máximo especificado en el paquete no se haya alcanzado. Este mecanismo no requiere conocer la topología de red, por lo que incluir o quitar nodos a la red resulta sencillo. Sin embargo, presenta varios problemas entre los cuales se encuentra el de "implosión" que implica el envío de paquetes duplicados al mismo nodo, y la "superposición" que ocurre cuando dos nodos envían el mismo paquete al mismo tiempo. Otro mecanismo de difusión es el de "rumores", similar a la "inundación" sólo que éste reenvía los paquetes a un sólo nodo vecino elegido de forma aleatoria; con lo que se trata de resolver el problema de "implosión" (Heinzelman et al. 1999).

Los algoritmos de enrutamiento basan su operación en una tabla que contiene las rutas para llegar a los demás nodos. Una ruta es la secuencia de saltos a otros nodos para llegar a un nodo de destino, cada nodo tiene su propia tabla dependiendo del lugar que ocupe dentro de la red. La topología de la red debe ser conocida y en caso de que ésta cambie es necesario un mecanismo de mantenimiento de rutas que actualice la información de la tabla de enrutamiento. Un ejemplo de un algoritmo de enrutamiento con mecanismo de mantenimiento

de rutas es el AODV (Perkins y Royer 1999), algoritmo creado para redes ad hoc móviles en donde la topología de la red cambia constantemente.

En una red de pocos nodos los mecanismos de difusión son recomendables ya que los paquetes pueden llegar al nodo de destino haciendo pocas retransmisiones. Por otra parte, si se emplea un algoritmo de enrutamiento el consumo de energía puede optimizarse ya que de antemano se conoce la ruta para entregar los paquetes al nodo de destino, haciendo sólo las retransmisiones necesarias. Sin embargo, se requiere espacio en la memoria para guardar la tabla de rutas. Por lo expuesto anteriormente y considerando que el microcontrolador elegido para implementar la comunicación ad hoc cuenta con suficiente memoria para guardar una tabla pequeña de rutas, se optó por un algoritmo de enrutamiento basado en una tabla estática de rutas.

La tabla estática de rutas usada para la red cuenta con tres campos: "nodo de destino", "nodo siguiente" y "número de rutas hacia el nodo de destino". Una vez que se conoce el "nodo de destino", se busca en la tabla el "nodo siguiente" al que debe ser enviado un paquete para llegar a su destino. Se revisa el número de rutas disponibles para llegar al "nodo de destino", si hay más de una ruta, en caso de que el paquete no pueda ser entregado usando la primera ruta, entonces se usarán las siguientes.

Una tabla de enrutamiento estática es fácil de implementar y funciona en escenarios con pocos nodos fijos. Sin embargo, si un nodo deja de formar parte de

la red o se agrega un nodo nuevo, es decir, si la topología de red cambia, se requerirá un mecanismo que actualice la tabla de rutas de cada nodo, de lo contrario, la comunicación en la red podría verse afectada al no contar con rutas válidas. En esta tesis no se contempla la implementación del mecanismo de mantenimiento de ruta y se deja como trabajo futuro.

4.3 Opciones de comunicación de radiofrecuencia de la tarjeta AC4790

Para formar la tabla de rutas se requiere conocer la dirección física de los nodos. Cada nodo tiene una tarjeta inalámbrica que cuenta con una dirección física única, llamada dirección MAC (dirección de control de acceso al medio), que es la dirección que se usa en la tabla para hacer el enrutamiento. Así mismo, la tarjeta de comunicación inalámbrica AC4790 ofrece características favorables para implementar el enrutamiento de los paquetes de la red ya que cuenta con tres directivas útiles llamadas directivas API: *transmit packet*, *send data complete* y *receive packet*. Dichas directivas se habilitan en la memoria EEPROM de la tarjeta. Al habilitarse la directiva *API transmit packet*, se puede colocar como encabezado de los paquetes la dirección de destino hacia la que van dirigidos. La directiva *API send data complete* indica a la tarjeta que cada vez que transmita un paquete espere una notificación de entrega por parte del nodo de destino y genere un aviso de "error" o "éxito" que debe entregar al dispositivo conectado a la tarjeta, de esta forma se tiene la opción de considerar la retransmisión del paquete en

caso de recibir un aviso de "error". La directiva *API receive packet* agrega información útil al paquete recibido, en la que se incluye la dirección del nodo que envió el paquete; una vez agregada dicha información, el paquete es enviado al dispositivo conectado a la tarjeta. Para implementar el algoritmo de enrutamiento se habilitan las directivas *API transmit packet* y *API send data complete*.

Por otra parte, la tarjeta AC4790 cuenta con una técnica de codificación de canal que consiste en agregar a cada paquete un código de redundancia cíclica CRC, mismo que el nodo receptor usa para determinar si el paquete contiene errores. Los paquetes cuyo CRC es correcto, se envían al dispositivo que se encuentre conectado a la tarjeta, en este caso, al microcontrolador. En caso contrario, pedirá automáticamente una retransmisión al nodo de origen hasta que el CRC del paquete sea correcto o hasta que se agoten las retransmisiones programadas en la tarjeta.

4.4 Algoritmo principal

En forma general, el microcontrolador revisa constantemente el puerto serie en espera de algún paquete. Si el nodo que recibe un paquete es el nodo de destino, el microcontrolador procesa el paquete, en caso contrario revisa su tabla de rutas para retransmitir el paquete al nodo adecuado para que llegue a su destino. El diagrama de flujo del programa se muestra en la figura 9.

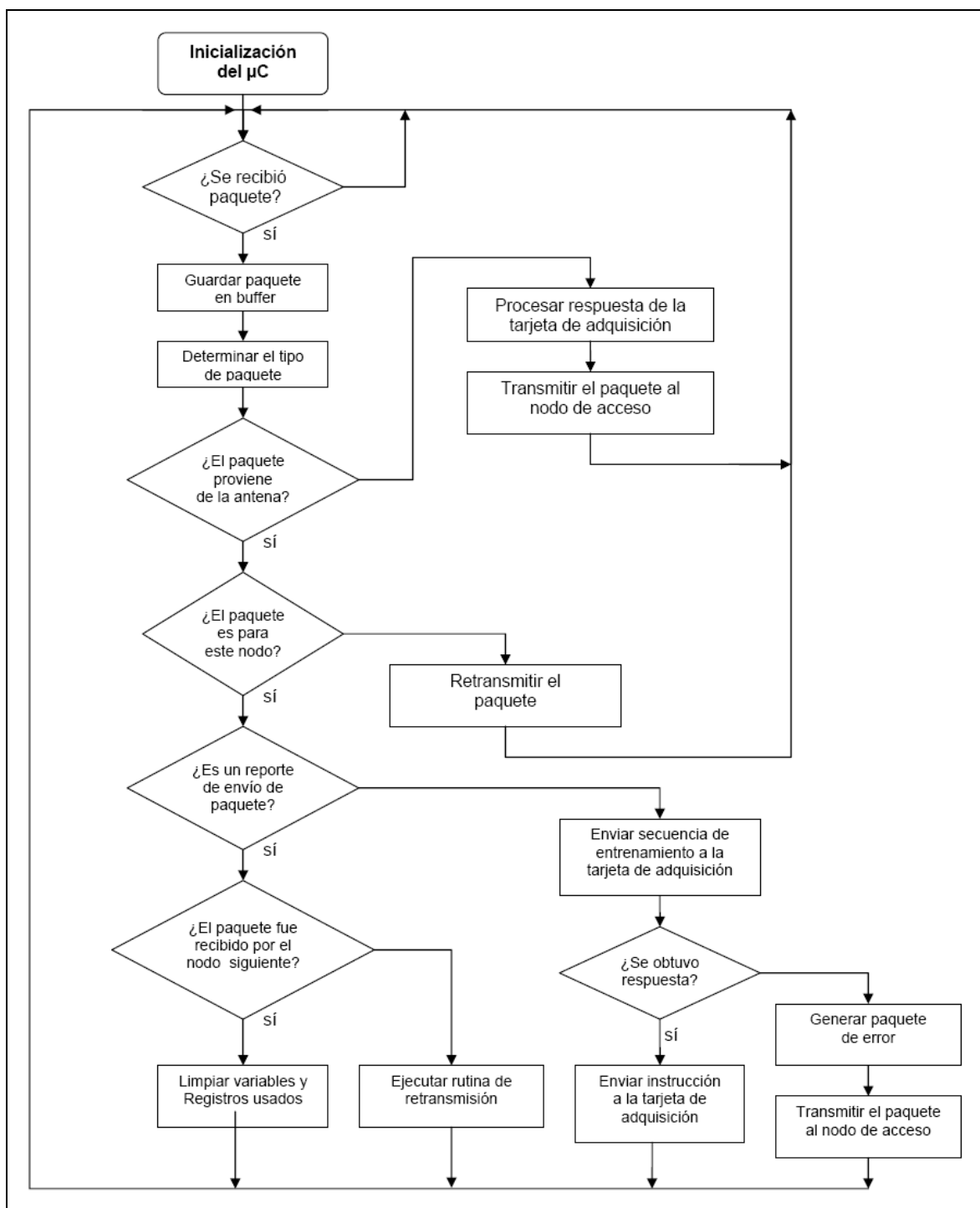


Figura 9. Diagrama de flujo del programa principal implementado en el microcontrolador PIC18LF452.

Al iniciar el programa, se inicializan variables y se habilitan las funciones del microcontrolador que se usarán en la ejecución del programa; se deshabilitan todas las funciones restantes con las que cuenta el microcontrolador para evitar comportamientos indeseados. Se configuran los bits 6 y 7 del puerto C como líneas de recepción RX y transmisión TX respectivamente para el puerto serie. Se configura una velocidad de transmisión de 9.6 Kbps con formato NRZ (un bit de inicio, 8 bits de datos y un bit de paro) y comunicación asíncrona *full duplex*. Se selecciona la señal de la tarjeta inalámbrica para que el microcontrolador pueda detectar si hay transmisión en el canal de radio. Por omisión, el microcontrolador siempre selecciona la señal de la tarjeta inalámbrica. Después de la inicialización, el microcontrolador entra a un ciclo eterno, donde revisa la bandera de recepción del puerto serie, la cual indica el arribo de algún byte al puerto. Cuando el microcontrolador recibe un paquete, lo guarda byte por byte en un arreglo auxiliar. Si se trata del primer byte recibido, se analiza el valor del byte para conocer el tamaño del paquete entrante y establecer cuántos bytes más se esperan recibir para considerar el paquete completo. Si el paquete proviene de la tarjeta inalámbrica, se considera como un paquete de red, y si proviene de la tarjeta de adquisición, se considera como un paquete de respuesta a una instrucción enviada a dicha tarjeta.

Una vez que se ha recibido todo el paquete entonces se analiza el encabezado para conocer la dirección MAC (control de acceso al medio). Si la dirección del

nodo que recibió el paquete coincide con la dirección destino del paquete, se procesa el resto del encabezado para efectuar las acciones correspondientes para interactuar con la tarjeta de adquisición. En este caso, se crea un mensaje que se envía a la tarjeta de adquisición solicitando la respuesta a una instrucción. Una vez que la tarjeta de adquisición contesta la instrucción solicitada, el microcontrolador recibe la respuesta y la empaqueta de forma adecuada para transmitir el paquete al nodo de acceso. El paquete elaborado incluye la dirección del nodo siguiente, que se obtiene al consultar la tabla de rutas, al que debe ser enviado el paquete para que éste llegue al nodo de acceso. El nodo envía el paquete elaborado mediante la tarjeta de comunicación inalámbrica y espera un mensaje positivo de entrega de paquete del nodo siguiente. Una vez que recibe dicho mensaje, el microcontrolador inicializa todas las variables y registros usados y se queda a la escucha de un nuevo paquete que procesar, es decir, el microcontrolador selecciona la señal de la tarjeta inalámbrica. En caso de que el mensaje sea negativo, se retransmitirá el paquete elaborado hasta recibir un mensaje positivo de envío de paquete o hasta que se agoten las oportunidades de retransmisión.

Las oportunidades de retransmisión incluyen la búsqueda de una nueva ruta si el número de retransmisiones se ha agotado para alguna de ellas. En caso de que exista una ruta alternativa para llegar al nodo de destino, es decir, que el campo "número de rutas" de la tabla de enrutamiento sea mayor a 1, se reenvía el paquete con la nueva ruta y se intenta nuevamente el número acordado de

retransmisiones. Si después de ejecutar estas acciones el mensaje de envío de paquete sigue siendo negativo, entonces se da por terminada la sesión, se inicializan todas las variables y registros usados y se queda a la escucha de un nuevo paquete que procesar.

En caso de que la dirección MAC de destino del paquete no coincida con la dirección MAC del nodo que lo ha recibido, el paquete se retransmite. Para ello, se consulta la tabla de rutas para determinar cuál es el siguiente nodo al que es necesario mandar el paquete para que pueda llegar al nodo de destino.

Se contempla también una posible falla en la tarjeta de adquisición, por la cual el microcontrolador se quedara a la espera de la respuesta a una solicitud hecha a la tarjeta de adquisición. Para evitar esta situación, cuando comienza la interacción con la tarjeta de adquisición, el microcontrolador activa un temporizador. En caso de que su tiempo expire y no se haya recibido respuesta de la tarjeta de adquisición, la tarjeta se considera dañada y el microcontrolador genera un mensaje de "error en tarjeta de adquisición" que envía al nodo de acceso. El temporizador expira después de 4 segundos. Una vez que el mensaje de error es enviado, el microcontrolador elige la señal de la antena y regresa al ciclo eterno, revisando la bandera de recepción del puerto serie, a la espera de paquetes para procesar. De esta forma, el microcontrolador continúa trabajando de manera estable.

4.5 Paquetes usados para implementar el algoritmo de enrutamiento

Los paquetes usados para implementar el algoritmo de enrutamiento en el sistema se muestran en la figura 10. En cada paquete se presenta el nombre del campo y en el renglón siguiente el número de bytes que ocupa cada campo. En todos ellos, se usa un encabezado idéntico de 7 bytes que es necesario agregar cuando se activa la instrucción *API transmit packet* en la tarjeta inalámbrica. El encabezado contiene la siguiente información: identificador de encabezado de paquete (81H), tamaño de la carga útil (128 bytes máximo), duración de la sesión (tiempo en que la comunicación entre los nodos está activa), número de retransmisiones (255 máximo) y dirección MAC del nodo siguiente. La tarjeta inalámbrica utiliza dicha información para configurar algunos parámetros para llevar a cabo la transmisión de la carga útil.

Dentro de la carga útil se agrega otro encabezado que el microcontrolador utiliza para identificar 4 tipos de paquetes: Instrucción, Datos, Error y ACK. El valor del primer byte de este encabezado identifica el tipo de paquete y los siguientes 3 bytes especifican la dirección destino del paquete. Cada paquete incluye en su encabezado otros campos que dependen del tipo de paquete del que se trate.

El paquete "instrucción" se utiliza para hacer la petición de alguna instrucción a la tarjeta de adquisición y para enviar sus respuestas al nodo de acceso, por ello cuenta con un campo llamado "tipo de instrucción" en el cual se especifica que

instrucción es requerida. Cuenta con 40 bytes que el microcontrolador utiliza para colocar la respuesta obtenida de la tarjeta de adquisición.

El paquete "datos" se utiliza para mandar al nodo de acceso un arreglo de datos obtenidos de la tarjeta de adquisición. Cuenta con un campo de 128 bytes para colocar dicha información.

El paquete "error" es generado por el microcontrolador cuando se detecta una falla de comunicación con la tarjeta de adquisición. Sólo cuenta con los campos "tipo de paquete" y "dirección de destino".

El paquete "ACK" es un reporte de "entrega de paquete" que genera la tarjeta de comunicación inalámbrica al activarse la instrucción *API send data complete*. El paquete "ACK" es un paquete local que envía la tarjeta al dispositivo conectado a ella (el microcontrolador). Este paquete consta de 4 bytes y tiene el siguiente formato: el primer byte indica el tipo de paquete (82H), los dos siguientes bytes reportan el nivel de potencia de la tarjeta local y de la tarjeta remota, respectivamente, y el cuarto byte indica si el paquete fue recibido o no por el nodo siguiente (01H éxito ó 00H falla).

4.6 Herramientas de programación

El programa del nodo sensor se escribió en una versión para estudiantes del lenguaje de programación C18 que es lenguaje ANSI C para microcontroladores de la familia 18 de Microchip. Esta decisión se tomó debido a que la autora de este

trabajo contaba con más experiencia programando en lenguaje C que en lenguaje ensamblador y porque el compilador de C18 se encarga de traducir el código escrito en lenguaje C a lenguaje ensamblador. Es importante mencionar que el lenguaje ensamblador y el lenguaje C pueden interactuar en un mismo programa si se usa este compilador, por lo que en modificaciones futuras al código, podrían escribirse algunas funciones en lenguaje ensamblador para reducir el código. El tamaño del programa escrito es de aproximadamente 8Kbytes, por lo que puede usarse un microcontrolador de al menos 16 Kbytes para esta aplicación.

La versión gratuita del compilador C18 puede obtenerse en Microchip 2006.

Tipo: Instrucción, clave 01H (7 bytes encabezado + 45 bytes)								
81	Tamaño de la carga útil	Duración de la sesión	Número de retransmisiones	MAC del siguiente salto	Tipo de paquete	MAC destino	Tipo de instrucción	Bytes libres para usar
1	1	1	1	3	1	3	1	40

Tipo: Datos, clave 02H (7 bytes encabezado + 128 bytes)							
81	Tamaño de la carga útil	Duración de la sesión	Número de retransmisiones	MAC del siguiente salto	Tipo de paquete	MAC destino	Datos y MPTR
1	1	1	1	3	1	3	124

Tipo: Error, clave 83H (7 bytes encabezado + 4 bytes)						
81	Tamaño de la carga útil	Duración de la sesión	Número de retransmisiones	MAC del siguiente salto	Tipo de paquete	MAC destino
1	1	1	1	3	1	3

Tipo: ACK, clave 82H (4 bytes)			
82	00H: Falla 01H: Éxito	RSSI	RSSI*
1	1	1	1

Figura 10. Paquetes usados para implementar el algoritmo de enrutamiento en el sistema.

Capítulo V

Operación del nodo de acceso

5.1 Introducción

En este capítulo se explica con detalle el funcionamiento del nodo de acceso que controla la recolección de los datos generados por los nodos de la red. Este nodo tiene cualidades distintas de procesamiento que el resto de los nodos por lo que se dedicó este capítulo para su descripción. Primeramente se explica el *hardware* del nodo de acceso y posteriormente se discute lo relacionado al *software* diseñado para su operación.

5.2 Hardware

El nodo de acceso es una computadora personal que se comunica de forma inalámbrica con los nodos sensores y cuenta con software diseñado para la recolección de los datos de los nodos de la red. Este nodo está instalado en un punto que cuenta con energía eléctrica alterna de 120 V y acceso a Internet.

Para dar comunicación inalámbrica al nodo de acceso, se usó una tarjeta de varios puertos, incluida en el kit de diseño que ofrece la compañía Aerocomm. Dicha tarjeta incluye una tarjeta AC4790 y opciones de conexión por RS232, RS485 y por USB. La computadora personal puede conectarse a alguno de esos puertos. La figura 11 muestra la tarjeta mencionada.



Figura 11. Tarjeta de varios puertos de Aerocomm.

5.3 Software

El programa del nodo de acceso está escrito en LabView 7.1 que es un lenguaje gráfico de programación de National Instruments. Cuenta con varias bibliotecas

con funciones previamente escritas que pueden utilizarse en la creación de proyectos. Cada función en LabView es considerada como un *instrumento virtual* denominado VI, que cuenta con dos representaciones: un diagrama de bloques y un panel frontal. El diagrama de bloques contiene el código del programa y el panel frontal es una interfaz gráfica que permite al usuario introducir y observar variables usadas en dicho programa.

Descrito de manera general, el programa envía las instrucciones necesarias para comenzar la descarga de datos de la tarjeta de adquisición, por medio de paquetes que tienen los encabezados adecuados para viajar por la red inalámbrica hasta llegar a su destino. En los siguientes párrafos se describe el programa de control y la recolección de datos.

5.3.1 Programa de control y de recolección de datos

El programa lleva a cabo las funciones de control y de recolección de datos de la red de sensores. La recolección de datos puede ser manual o automática. De forma manual, el usuario selecciona el nodo al cual desea conectarse, configura algunos parámetros para la comunicación del puerto serie, y comienza la descarga. En la descarga automática, el usuario debe programar de manera anticipada una lista de tareas. La lista de tareas indica la hora y el nodo del cual se deben recolectar los datos. La descarga de datos comienza cuando la hora de la computadora es igual a la hora programada por el usuario. En ambos casos, la

manual y la automática, al finalizar la descarga, los datos recolectados son enviados por correo electrónico a los usuarios registrados en el sistema.

El programa está escrito en una estructura de eventos, en donde los eventos son activados mediante botones presentados gráficamente al usuario, o en el caso de la descarga automática de datos, por la coincidencia del reloj de la computadora y la hora de la tarea programada. El diagrama de flujo del programa del nodo de acceso se presenta en la figura 12.

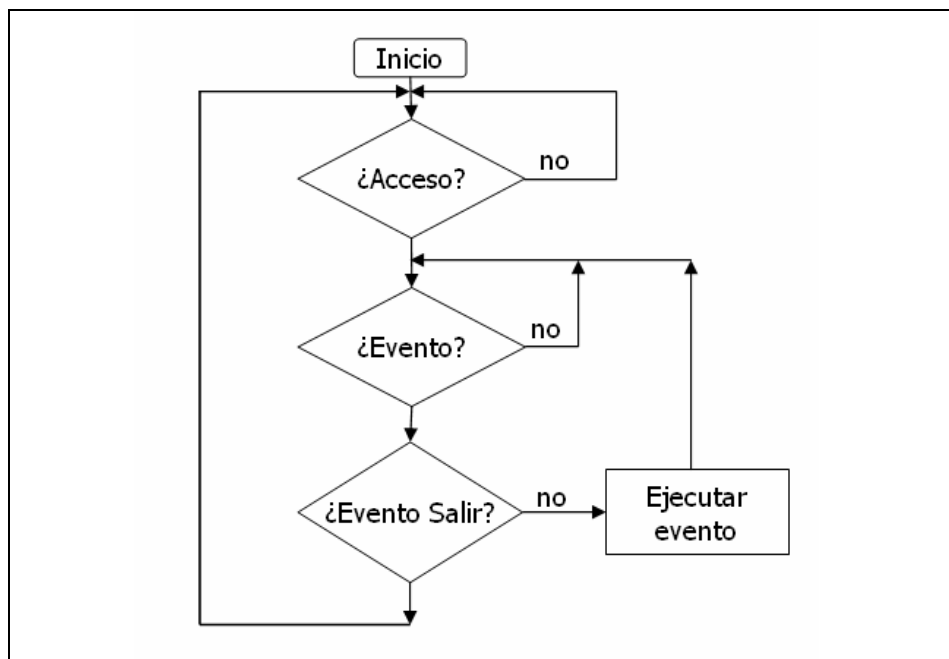


Figura 12. Diagrama de flujo del programa del nodo de acceso.

Al iniciar, el programa requiere la identificación de los usuarios los cuales deberán ingresar un nombre de usuario y contraseña válidos para tener acceso. Una vez que se tiene acceso, se presentan dos ventanas llamadas "descarga manual" y "configuración". Ambas ventanas contienen botones de control que representan un evento dentro del programa. En las figuras 13 y 14 se muestran las ventanas de "descarga manual" y "configuración", respectivamente.

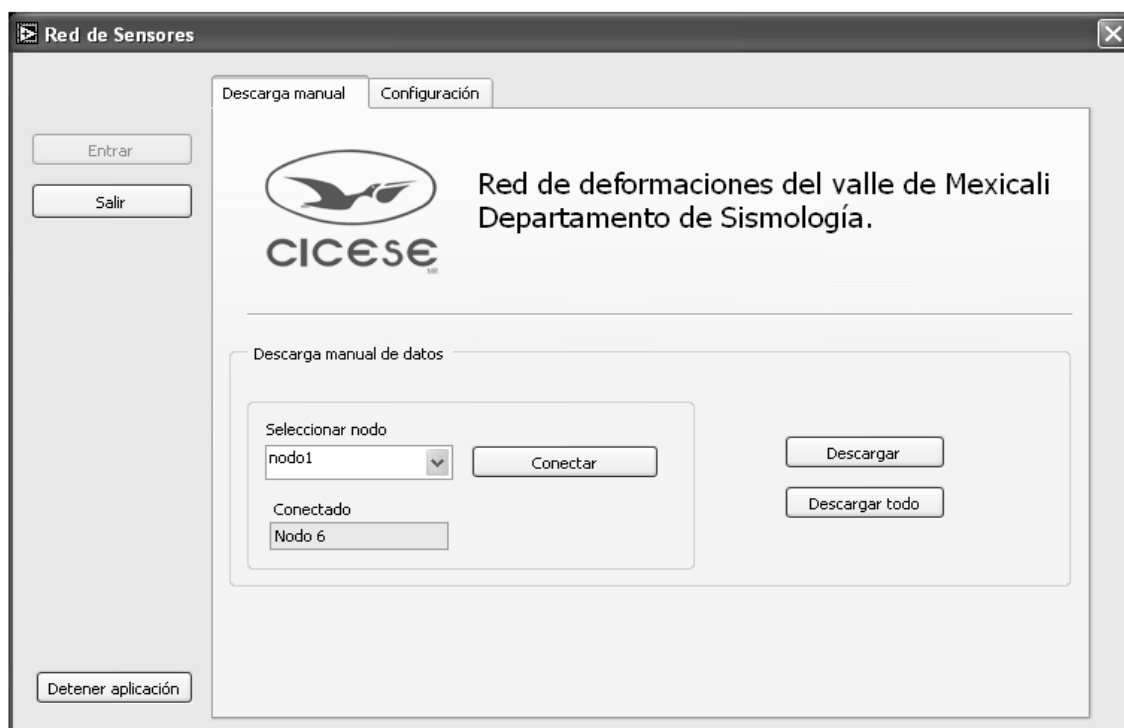


Figura 13. Programa de control y recolección de datos. Ventana de descarga manual.

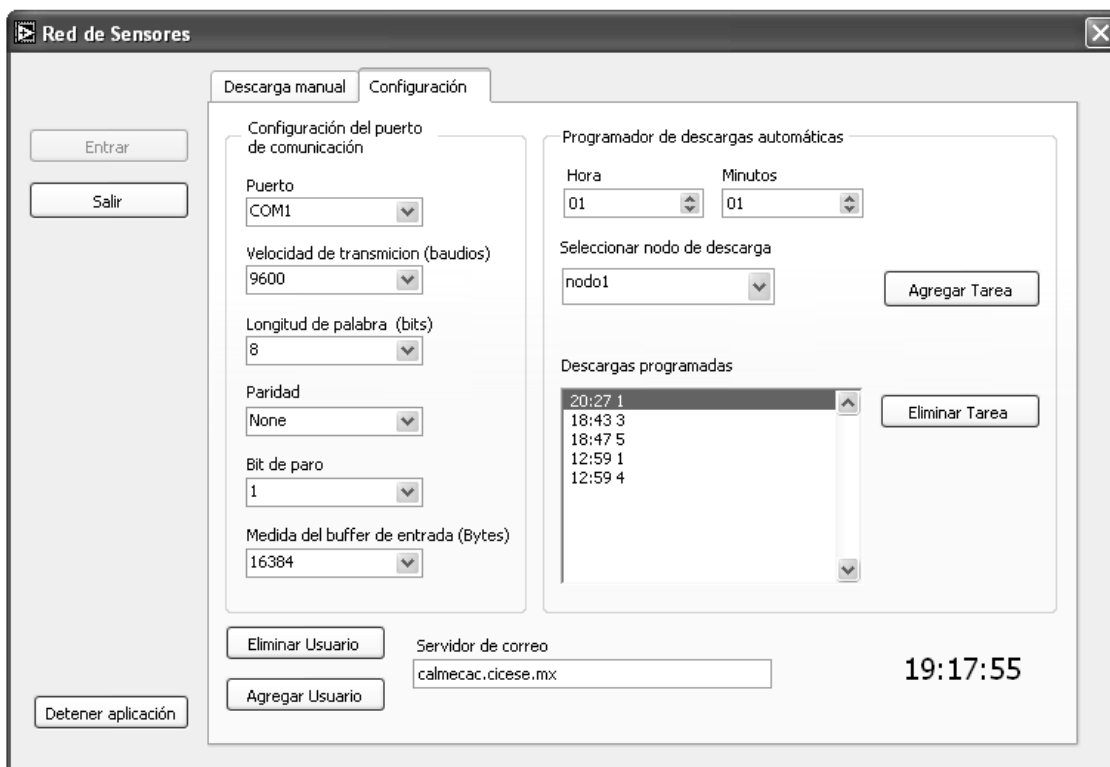


Figura 14. Programa de control y recolección de datos. Ventana de configuración.

En la ventana de “descarga manual”, el usuario puede realizar una descarga manual de los datos. Es necesario que para ello seleccione el nodo del cual desea recolectar los datos y presionar el botón “conectar”, posteriormente debe presionarse el botón “descargar” si se desea realizar una descarga parcial de los datos o “descarga completa” si se requiere obtener todos los datos de la memoria de la tarjeta de adquisición. Una vez hecho esto, el programa forma los paquetes adecuados para transmitir a la red, basándose en los tipos de paquetes mostrados en la figura 10 del capítulo 4.

Si el enlace con el nodo de interés se establece, entonces comienza la descarga de los datos y una nueva ventana se abre automáticamente para mostrar los datos que están siendo descargados y se presenta de manera gráfica el progreso de la descarga; en caso contrario, se informa al usuario del error mediante un mensaje en pantalla y la descarga se detiene. El programa también detiene la descarga en caso de recibir un mensaje de "error en tarjeta de adquisición" generado por el nodo encuestado.

Por otro lado, la ventana de "configuración", permite al usuario programar la descarga de los nodos deseados a determinada hora del día y también le permite eliminar tareas programadas. En esta ventana se configuran las características del puerto serie, como la velocidad de transmisión, formato de los datos y la elección de puerto. También se configura el servidor de correo electrónico que usará la aplicación para enviar los datos recolectados a los usuarios. Se ofrece la opción de agregar o eliminar usuarios al sistema; de esta forma, siempre hay un control del personal que tiene acceso.

En caso de presentarse algún error en la descarga automática, los reportes de error son enviados a los usuarios por correo electrónico.

5.3.2 Página electrónica

Para tener acceso remoto a la red inalámbrica de sensores a través de Internet se requiere de una página electrónica y un servidor de páginas WEB. Por cuestiones

de simplicidad, se usa el servidor de páginas WEB que viene incluido en la versión 7.1 de LabView, el cual permite publicar páginas electrónicas que contienen VI's. De esta forma, el usuario puede tener acceso al mismo programa instalado en el nodo de acceso a través de la página electrónica. El servidor de páginas WEB se instala en la computadora designada como nodo de acceso, por lo que es necesario que dicha computadora cuente con una dirección IP pública para que los usuarios puedan acceder a la página. Para publicar la página se empleó la herramienta *Web Publishing* incluida en LabView 7.1. En la figura 15 se muestra la página electrónica.

Para acceder a la página se usa la dirección IP pública del nodo de acceso y el nombre de la página Web: Red_de_sensores.htm. Por ejemplo, si la dirección del nodo de acceso es 158.97.23.129, para acceder a la página en el navegador WEB se escribe: http://158.97.23.129/Red_de_sensores.htm. Una vez en la página, para tomar el control del programa se usa el botón secundario del ratón y se selecciona la opción "Request Control to VI". De esta forma, el usuario tiene acceso al mismo programa que se encuentra instalado en el nodo de acceso y por ello el usuario debe identificarse con un nombre y una clave de acceso válidos. Antes de abandonar la página WEB es necesario regresar el control del programa al nodo de acceso, para ello se usa el botón secundario del ratón y se selecciona la opción "Release Control to VI". Es importante mencionar que sólo un usuario puede tener acceso al programa de control y recolección de datos, ya sea

mediante Internet o directamente en la computadora designada como nodo de acceso.

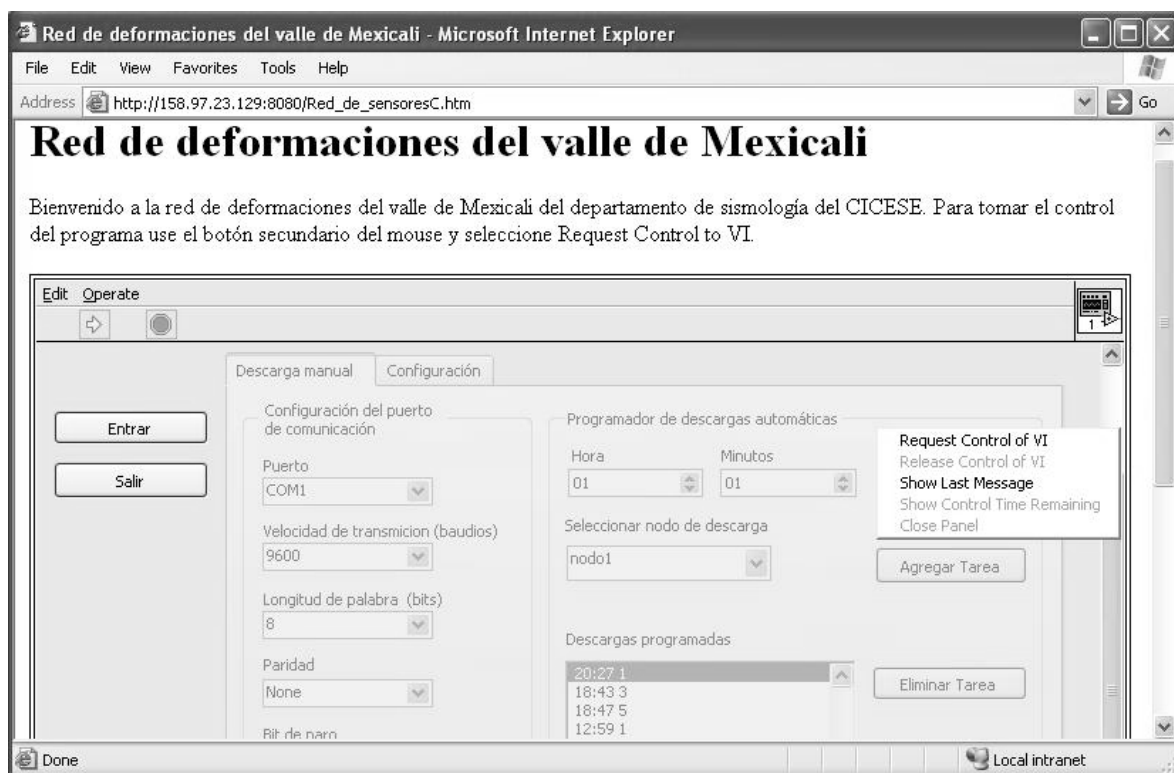


Figura 15. Página electrónica para el acceso remoto a la red.

Capítulo VI

Conclusiones

6.1 Conclusión

En esta tesis se diseñó e implementó un sistema de comunicación inalámbrico específico para una red de sensores de largo alcance usando la tarjeta inalámbrica AC4790 de Aerocomm que transmite hasta 1 W de potencia, a la cual se agregó la capacidad de comunicarse de forma *ad hoc* por medio de un microcontrolador, mismo que se encarga de la interacción con los sensores. La comunicación *ad hoc* se implementó mediante un algoritmo de enrutamiento que usa una tabla estática de rutas.

Se diseñó el software necesario para la adquisición de los datos de la red, que permite la descarga manual o automática de éstos. Asimismo, se diseñó una página WEB para la adquisición remota de los datos a través de Internet.

El diseño de la red ad hoc de largo alcance representa una alternativa para aplicaciones en donde los sensores están ubicados a grandes distancias unos de

otros, considerando que en el mercado actual no existe el equipo adecuado para dar solución a este tipo de aplicaciones.

En principio, el sistema diseñado intenta dar solución al problema de recolección de datos que presenta la *Red de deformaciones del valle de Mexicali*. Sin embargo, el sistema desarrollado puede usarse en cualquier aplicación que requiera de comunicación inalámbrica de largo alcance y que use la tarjeta de adquisición CR10X de Campbell Scientific.

6.2 Trabajo futuro

Si bien los resultados obtenidos cumplen satisfactoriamente los objetivos planteados al comienzo del proyecto, es posible mejorar el desempeño del sistema desarrollado. Para ello se sugiere implementar en el microcontrolador un algoritmo de mantenimiento de ruta para mantener rutas válidas en las tablas de enrutamiento ya que en este trabajo se empleó una tabla de rutas estática, lo que implica que cada vez que se agregue o se quite un nodo, la tabla de enrutamiento de cada uno de los nodos que integren la red debe modificarse manualmente, esto es, cambiar el programa grabado en la memoria de cada microcontrolador. Al agregar un algoritmo de mantenimiento de ruta, un cambio de topología en la red sería transparente para el sistema inalámbrico, ya que dicho algoritmo actualizaría automáticamente las tablas de rutas de todos los nodos de la red sin necesidad de intervención humana.

Otra alternativa para mejorar el desempeño de la red podría ser cambiar el algoritmo de enrutamiento por un mecanismo de difusión. Podría usarse la interfaz inalámbrica diseñada y sólo cambiar el programa del microcontrolador. En este aspecto, al final de este proyecto de tesis se inició la reestructuración del programa principal del microcontrolador para implementar el algoritmo N-a-1 propuesto en (Lou W. 2005). Dicho algoritmo está basado en un mecanismo de difusión. Su implementación y adaptación al sistema diseñado se exponen en el apéndice A. Desde luego, aún quedan varios problemas que resolver antes de concluir esta propuesta y se proponen como trabajo futuro.

Referencias

- [1] Agrawal D. P., Biswas R., Jain N., Mukherjee A., Sekhar S. y Gupta A. 2005. Sensor systems: state of the art and future challenges. En: Wu J. (ed.). Handbook on theoretical and algorithmic aspects of sensor, ad hoc wireless, and peer-to-peer network. Auerbach Publications, New York, 318-345 p.
- [2] Haenggi M. 2005. Opportunities and Challenges in Wireless Sensor Networks. En: Ilyas M. y Mahgoub I. (ed.). Handbook of sensor networks: compact wireless and wired sensing systems. CRC Press, Florida, I-1 p.
- [3] Rappaport T. S. 2002. Wireless communications, principles and practice. Prentice Hall PTR. Segunda edición. New Jersey. 105-110, 255-350, 355-412 p.
- [4] Akyildiz I. F., Su W., Sankarasubramaniam Y., y Cayirci E. 2002. Wireless sensor networks: a survey. Computer Networks. 38 (4): 393–422 p.
- [5] Heinzelman W.R., Kulik J. y Balakrishnan H. 1999. Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks. MobiCom '99. Seattle, 174-185 p.
- [6] Perkins C. E. y Royer E. M. 1999. Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing. 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications. New Orleans, 90–100.
- [7] Prasad R. 1998. Universal wireless personal communications. Artech House Inc. Boston. 29-64 p.
- [8] Wolff E. A. 1988. Antenna analysis. Artech House Inc. Norwood. 4, 43, 37-48 p.
- [9] 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.

- [10] IEEE 2003. Estándar IEEE 802.15.4.
<http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html>
- [11] Diario Oficial de la Federación. 13 de marzo del 2006. Acuerdo por el que se establece la política para servicios de banda ancha y otras aplicaciones en las bandas de frecuencias del espectro radioeléctrico 902 a 928 MHz; 2,400 a 2,483.5 MHz; 3,600 a 3.700 MHz; 5,150 a 5,250 MHz; 5,250 a 5,350 MHz; 5,470 a 5,725 MHz y 5,725 a 5,850 MHz"

http://www.cft.gob.mx/cofetel/html/9_publica/acuerdos/acuerdo_banda.pdf
- [12] Chipcon. <http://www.chipcon.com/> .Septiembre 2005.
- [13] Crossbow. <http://www.xbow.com/> .Septiembre 2005.
- [14] Dust Networks. Time Synchronized Mesh Protocol.
<http://www.dustnetworks.com/technology/tsmp.shtml> .Septiembre 2005.
- [15] Microhard systems. <http://www.microhardcorp.com/> .Septiembre 2005.
- [16] Aerocomm. <http://www.aerocomm.com/> . Septiembre 2005.
- [17] Maxstream. <http://www.maxstream.net/> . Septiembre 2005
- [18] Microchip.
http://www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS_GET_PAGE&nodeId=1406&dDocName=en010014&part=SW006011. Marzo 2006.
- [19] Campbell Scientific 1997. CR10X measurement and control module operator's manual. Revision 5/97.
- [20] Aerocomm 2006. AC4790 900 MHz OEM transceivers. User's Manual, version 1.3.

Apéndice A

Protocolo alternativo de enrutamiento para el sistema diseñado

El algoritmo de enrutamiento basado en una tabla de rutas estática que se empleó en el sistema diseñado, no es capaz de aprender rutas nuevas por lo que un cambio en la topología de la red implica cambiar manualmente las tablas de enrutamiento de todos los nodos. Para evitar este inconveniente se propone reemplazar dicho algoritmo por un mecanismo de difusión y evaluar el desempeño del sistema diseñado. Una alternativa viable es usar el algoritmo M-a-1 propuesto en (Lou W. 2005) y agregarlo al programa principal del microcontrolador. En los siguientes párrafos se describe brevemente dicho algoritmo y su integración al sistema diseñado.

A.1 El algoritmo M-a-1

El algoritmo M-a-1 saca provecho de la inundación simple agregando dos mecanismos que, al final de la inundación, permiten a los nodos

conocer rutas alternativas para llegar al nodo de base, que es el nodo que inicia la inundación.

En esta implementación, sólo se consideró el primer mecanismo.

El algoritmo M-a-1 basa su operación en el hecho de que al final de una inundación simple se obtiene un árbol encabezado por el nodo de base cuyas ramas están formadas por los nodos de la red más cercanos, en donde cada rama es independiente. Este algoritmo pretende unir dichas ramas para proveer más rutas de regreso al nodo de base a cada nodo de la red.

La estructura del mensaje empleado en el primer mecanismo es $\{tipo, mid, nid, bid, cst, ruta\}$, donde *tipo* es el tipo de mensaje, en este caso es RPRI; *mid* es el número de secuencia de la actualización de ruta; *nid* es el identificador del nodo que envía el mensaje; *bid* es el identificador de rama que es el *nid* del nodo más cercano al nodo de base; *cst* es el costo de la ruta que puede ser el número de saltos; *ruta* es la ruta por la cual ha viajado el paquete.

El nodo de base inicia la inundación con el mensaje $\{RPRI, mid, Sink, \emptyset, 0, (Sink)\}$. Cada nodo *z* al escuchar el mensaje por primera vez, agregará el nodo *nid* como su vecino y aprenderá la primera ruta para regresar al nodo de base siguiendo en orden inverso la ruta contenida en el campo *ruta*. 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: remplazar el campo *nid* con su propio identificador de nodo ID; si el *bid* es \emptyset (implica 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; actualizar el campo *ruta* 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. 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 alternativas otra ruta para llegar al nodo de base.

A.2 Integración del algoritmo M-a-1 al sistema diseñado.

El algoritmo M-a-1 es útil para que los nodos tengan al menos una ruta de regreso al nodo de base, es decir, provee comunicación en un sólo sentido. Para proveer al sistema de comunicación en dos sentidos, es necesario agregar un algoritmo que permita al nodo de base conocer la ruta o rutas para llegar a un determinado nodo. El algoritmo agregado para ello usa dos tipos de mensajes: RREQ y RREP.

RREQ es una petición de ruta enviada por el nodo de base. RREP es la respuesta a dicha petición que envía el nodo destino al nodo de base en cuanto recibe un RREQ. El mensaje RREQ es un mensaje de difusión mientras que RREP se envía siguiendo una ruta descubierta previamente al usar el algoritmo M-a-1.

El mensaje RREQ cuenta con los campos {Tipo, destino (difusión), número de saltos, número de secuencia, nodo de destino, nodo previo}.

El mensaje RREP cuenta con los campos {Tipo, destino, número de secuencia, nodo origen, nodo que envía el mensaje}. Cuando el nodo *z* recibe el mensaje RREQ actualiza el *número de saltos* y revisa el *nodo de destino*, si es su vecino le envía a éste el mensaje RREQ colocando

en *destino* la dirección del nodo vecino y en *nodo previo* su propio ID. Si el *nodo de destino* no es su vecino, difunde el mismo mensaje, actualizando el *número de saltos* y colocando su propio ID en *nodo previo*. Cuando el mensaje RREQ llega a su destino, dicho nodo genera un mensaje RREP, en donde *destino* es el nodo de base, en *nodo origen* coloca su propio ID, y en *nodo que envía el mensaje* su propio ID. Este mensaje RREP es enviado al nodo que se indica en el campo *nodo previo* del mensaje RREQ que se está contestando. Cuando el nodo z recibe el mensaje RREP, actualiza su tabla de rutas con la información contenida en el mensaje (nodo de destino = *nodo origen*; siguiente salto = *nodo que envía el mensaje*). El nodo z coloca en el campo *nodo que envía el mensaje* su propio ID, busca en su tabla de rutas una ruta para llegar al nodo de base (previamente descubierta con el algoritmo M-a-1) y envía el mensaje RREP.

El proceso consiste en inundar a la red con el mensaje RPRI. Después de ello, el nodo de base envía un mensaje RREQ para conocer una ruta para llegar al nodo z. El nodo de base espera un mensaje RREP por parte del nodo z. Después de esperar un tiempo t , si no se ha recibido el mensaje RREP se envía nuevamente un mensaje RREQ con un nuevo número de secuencia; si se recibe el mensaje RREP, se envía la petición de datos al nodo z usando la ruta contenida en el mensaje RREP. Para

pedir datos de la tarjeta de adquisición al nodo z , se usa el mensaje PETICION.

La implementación del algoritmo M-a-1 y del algoritmo para la comunicación hacía adelante, y su integración al programa principal propuesto en esta tesis, está terminada. Sin embargo, al probar el programa con el hardware diseñado se presentaron problemas de colisiones a causa de los mensajes de difusión. Este problema está relacionado con la tarjeta AC4790 que no puede resolver las colisiones que se generan al enviar mensajes de difusión por varios nodos al mismo tiempo. Para resolver este problema se sugiere que cuando un nodo requiera enviar un mensaje de difusión, éste espere un tiempo aleatorio t antes de enviarlo. El tiempo t debe implementarse activando un *contador* en el microcontrolador y asociando a éste una rutina de interrupción, de tal forma que cuando el contador termine su cuenta, el microcontrolador ejecute la rutina de interrupción en la que el mensaje de difusión sea enviado. Es recomendable programar la rutina de interrupción ya que de esta forma, el programa principal sigue ejecutándose normalmente, es decir, pueden recibirse y procesarse otros mensajes.