

Implementación de una red inalámbrica de sensores para prevenir incendios forestales. Plataforma *MXBee* y protocolo *Fire Alarm Routing Algorithm – FARA*

Ricardo Marcelín Jiménez Enrique Rodríguez de la Colina Miguel Ángel Landero Rodríguez

Universidad Autónoma Metropolitana - Iztapalapa, Maestría en Ciencias y Tecnologías de la Información,
Noviembre 2012, México, D.F.

Resumen—En las redes inalámbricas de sensores los motes generalmente utilizan baterías como fuente limitada de energía. Este trabajo propone la investigación y desarrollo de una solución que adecue los parámetros de operación de las capas de aplicación, red y física en base a las condiciones ambientales del fenómeno bajo observación, en este caso, las medidas de monitoreo de temperatura de un bosque. De esta forma los recursos energéticos se usan a favor del objetivo principal de prolongar la vida útil del sistema. Se incluye la evaluación de desempeño de la implementación de una red con dispositivos Mica2 y el propuesto *Fire Alarm Routing Algorithm – FARA*. También, se muestran los avances del desarrollo de una plataforma de hardware propia llamada *MXBee* que utiliza el protocolo IEEE 802.15.4. Finalmente, se incluyen los aportes más relevantes del sistema propuesto en la prevención de incendios forestales.

Palabras Clave — WSN - Wireless Sensor Network, mote - remote sensor, Mica2, ZigBee.

1. INTRODUCCIÓN

La fuente de energía más común en WSNs son las baterías que rara vez suelen sustituirse debido a las extremas condiciones topográficas del lugar de observación del fenómeno como el presente caso, en un bosque. Algunas veces se tienen motes que están continuamente energizados o utilizan algún otro suministro como paneles solares o energía eólica como sistemas de recarga, pero el aumento en el costo y la complejidad relativa del subsistema van en contra de la esencia de estas redes que forman redes ad hoc simples y económicas. En este contexto, uno de los mayores retos es crear soluciones que usen los recursos energéticos de forma adecuada para prolongar la vida útil y operativa de la red [1][2]. Esta tarea usualmente se realiza mediante el desarrollo de soluciones multicapa que interactúan sobre la pila de protocolos para WSNs [3] de la figura 1.

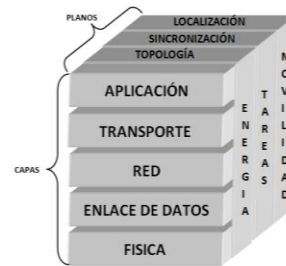


Figura 1. Pila de protocolos para WSNs.

La presente propuesta de proyecto de investigación forma parte de este tipo de soluciones. El sistema adapta el procesamiento interno del mote y la frecuencia de intercambio de mensajes de datos y de señalización sobre la red basándose en el análisis de la información recolectada por los sensores del medio ambiente. Investigaciones como en las referencias [4][5] indican que las WSNs consumen gran parte de la energía durante el proceso de comunicación inalámbrica de aquí la motivación del presente proyecto. Además, los costos actuales de este tipo de redes rebasan aún las posibilidades adquisitivas en las cuales se integren cantidades masivas de nodos por lo cual también se propone el diseño y desarrollo de una plataforma de hardware propia, que sea más accesible al mercado. El plan del proyecto contempla la investigación, desarrollo e implementación de una de una red inalámbrica de sensores que adecue los parámetros de operación de las capas de aplicación, red y física. El sistema como entrada las medidas de temperatura recolectadas del medio ambiente y las compara con los umbrales establecidos para la detección de fuego. De esta forma se establecen el estado normal o alarmado de la red y sus correspondientes parámetros de operación. Algunos de estos parámetros son el intervalo de recolección y envío de datos, el intervalo de actualización de rutas, la potencia de transmisión, la tasa de transmisión de datos, entre otros. Inicialmente, en la sección 2 se enuncian los objetivos generales y específicos del proyecto. La sección 3 describe la metodología utilizada para el desarrollo, implementación y evaluación de la solución propuesta. La sección 4 describe de forma general el sistema y su funcionamiento. La sección 5, 6 y 7 se concentran en las modificaciones a la capa física, de red y de aplicación respectivamente. En la sección 8 se evalúa y compara el desempeño de la propuesta con otras soluciones similares. Finalmente, en la sección 9 se establecen los aportes del sistema a la prevención de incendios forestales y las conclusiones.

MexBee: I+D en hardware para redes inalámbricas de sensores. Reporte de avances del proyecto de investigación II. Universidad Autónoma Metropolitana – Iztapalapa. Posgrado en Ciencias y Tecnologías de la Información. División de Ciencias Básicas e Ingeniería. México. D.F. Noviembre 2012.
Alumno: MALR/malr_82@yahoo.com.mx
Asesores: RMJ/cal@xanum.uam.mx, ERC/erod@xanum.uam.mx
Colaboradores: José Luis Marzo / UdG / joseluis.marzo@udg.edu Mauricio López Villaseñor / UAM-Iztapalapa / ixoic@xanum.uam.mx Manuel Ruiz Sandoval/UAM-Azcapotzalco/manuel.ruizsandoval@gmail.com

2. OBJETIVOS

A. General

Aplicar el conocimiento adquirido durante la maestría para investigar, desarrollar e implementar una red inalámbrica de sensores para prevenir incendios forestales que adapte los parámetros de operación del sistema para un uso adecuado de los recursos energéticos y así prolongar la vida útil de la red.

B. Específicos

- Realizar el estado del arte de las soluciones actuales para prevenir incendios forestales con redes inalámbricas de sensores.
- Proponer y diseñar una solución innovadora y de vanguardia para la prevención de incendios forestales con redes inalámbricas de sensores.
- Evaluar y comparar el desempeño de la solución propuesta en diversas plataformas de hardware.
- Establecer y concluir los aportes del sistema propuesto en la prevención de incendios forestales.
- Escribir la tesis incluyendo la comunicación idónea de resultados.

3. METODOLOGÍA

- Investigar el funcionamiento, estructura y configuración de soluciones actuales de redes de sensores inalámbricas para prevención de incendios forestales.
- Analizar y catalogar las soluciones existentes.
- Establecer los requerimientos del sistema.
- Establecer los parámetros de operación del sistema.
- Diseñar una solución multicapa que interactúe con la pila de protocolos para redes inalámbricas de sensores que favorezca el ahorro de los recursos energéticos de la red.
- Implementar la solución propuesta con motes Mica2 versus la API del protocolo ZigBee / IEEE 802.15.4.
- Realizar experimentos para evaluar y comparar el desempeño de la solución propuesta en base a las siguientes métricas:
 - Lecturas de temperatura de los nodos en la red.
 - Ahorro de energía vs. Número de mensajes.
 - Tiempos de propagación de mensajes.
 - Tiempos de vida de la red.
- Establecer los aportes relevantes del sistema en la prevención de incendios forestales.

4. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El funcionamiento del sistema comienza al recibir como entrada los datos de temperatura del medio ambiente recolectados por el sensor. Estos valores se introducen al sistema donde la capa de aplicación determina si los datos están dentro del umbral establecido (estado normal) y en caso contrario el mote envía un mensaje de alarma hacia la estación base para posteriormente iniciar la reprogramación de la red con los parámetros establecidos en caso de contingencia (estado alarmado). A cada estado se asocian los parámetros que se muestran en la tabla 1.

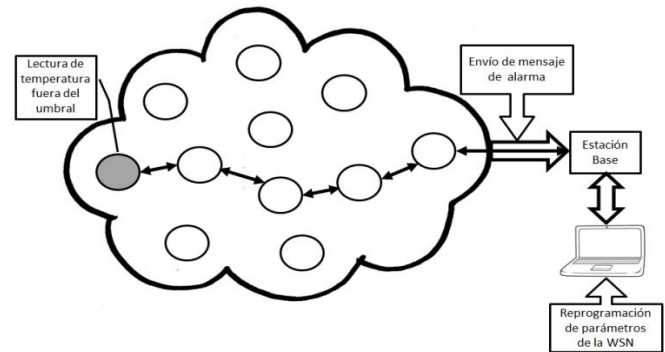


Figura 2. Notificación de alarma a la estación base.

Los valores para cuando el sistema está alarmado fueron establecidos en base a las recomendaciones de investigaciones previas [7][8] donde señalan que se debe tener un mínimo de 2 segundos para no saturar el procesamiento en el mote y un factor entre 5 y 8 para actualización de rutas. En el caso del estado normal, los valores se propusieron para prolongar la vida operativa de la red y que fueron obtenidos del análisis de los resultados de la implementación y experimentación de una WSN en un bosque. La red constaba de 16 motes Mica2 en la banda ISM de 900MHz. El estudio antes mencionado se muestra en el anexo A. Los valores para el umbral de temperatura máxima se tomaron como de la referencia [6] en la que se ha estudiado amplia y prácticamente el fenómeno de incendios forestales.

TABLA 1. PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LA WSN

Estado	Parámetro	Valor
Normal	Potencia de transmisión	-20dBm → 0.01mW
	Intervalo de actualización de rutas	3600 s → 1hr
	Intervalo de recolección de datos	60 s → 1min
Alarmado	Potencia de transmisión	5dBm → 3.2 mW
	Intervalo de actualización de rutas	10 s
	Intervalo de recolección de datos	2 s
Umbral	Temperatura Máxima en Verano	40°C
	Temperatura Máxima en Invierno	30°C

*mW = miliWatt, dBm = decibelios en relación a un nivel de referencia de 1 mW, min = minuto, hr = hora, s = segundo.

La solución propuesta interactúa con la pila de protocolos para WSN tal y como se ilustra en la figura 3 donde se muestra la dependencia de los parámetros de operación de las capas de red y física respecto a los valores que son leídos por los sensores en la capa de aplicación.

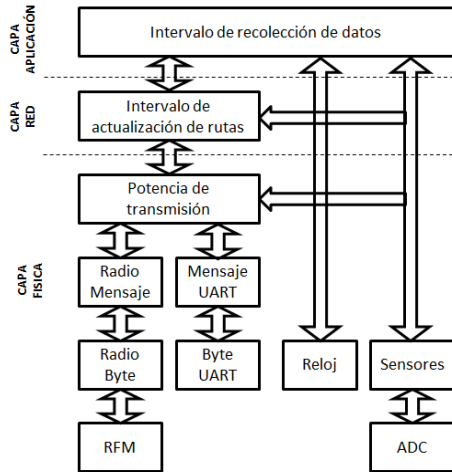


Figura 3. Pila del protocolo propuesta (interacción entre capas).

El proceso que realiza el protocolo propuesto se ilustra en el diagrama de flujo de la figura 4. El sistema inicialmente opera con los parámetros establecidos para el estado normal y cada vez que se toma una recolecta una lectura del sensor es comparada con el umbral correspondiente según la temporada del año en que esté operando la WSN. En caso de que la lectura no se encuentre dentro del umbral se envía un mensaje de alarma a la estación base la cual inicia un proceso de reconocimiento de los nodos participantes que conforman la red. La estación base es capaz de reconocer los motes que envían el mensaje para tener la localización del lugar en donde se generó la alarma. Esta localización se debe tener previamente por medio de dispositivo como un GPS. Una vez que se ha reconocido los nodos que conforman la red se procede a la reprogramación de los mismos pero con los parámetros de estado alarmado que permitirán tener información más rápidamente del estado de la red. Es decir, la disminución en el intervalo de recolección de datos permitirá saber que tan rápido se ha elevado la temperatura en los motes alarmados, así como disminuir el intervalo de actualización de rutas ofrecerá al sistema tener tablas de rutas actualizadas constantemente lo cual ayudará al conocimiento de la conectividad de la red en cualquier tiempo teniendo en cuenta que se pueden tener pérdidas de nodos por diversas causas, por ejemplo, la propagación del fuego. En cuanto al incremento en la potencia de transmisión en los motes es de gran utilidad ofreciendo así mayor alcance y una tolerancia a fallas o pérdidas de conectividad por las repercusiones del fuego. Cabe señalar que en este contexto de contingencia no se escatima en el uso de los recursos de la red versus las consecuencias que se producirán en el medio ambiente por el crecimiento y pérdida de control del incendio forestal. Cuando la lectura del sensor permanece dentro del umbral no se envían mensajes y se opera con los parámetros normales que prolongan la vida operativa de la WSN.

Cuando la lectura del sensor permanece dentro del umbral no se envían mensajes y se opera con los parámetros normales que prolongan la vida operativa de la WSN.

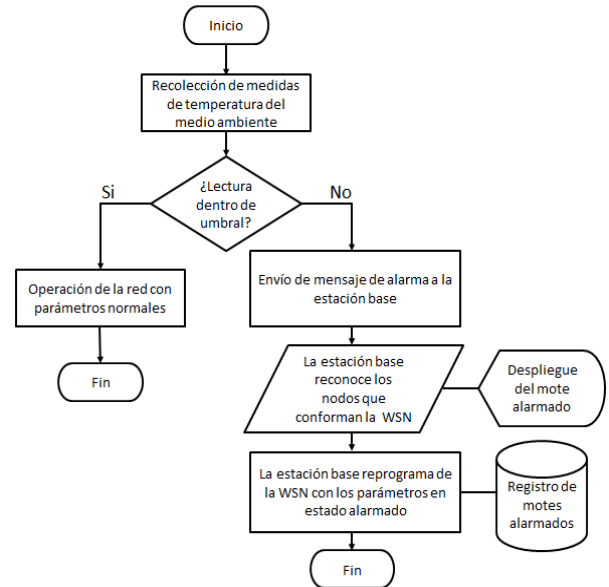


Figura 4. Diagrama de flujo del protocolo propuesto.

A. CAPA FÍSICA

La capa física está conformada principalmente por el procesador, el transceptor y los sensores. Usualmente, se utilizan otros módulos que complementan la funcionalidad del nodo como puede ser dispositivos de localización o GPS, sistemas de energía como celdas solares y sistemas actuadores. Sobre estos dispositivos se configura los parámetros como potencia de transmisión, intervalo de recolección de datos, tasa de transferencia de datos, el tipo de modulación, entre otros.

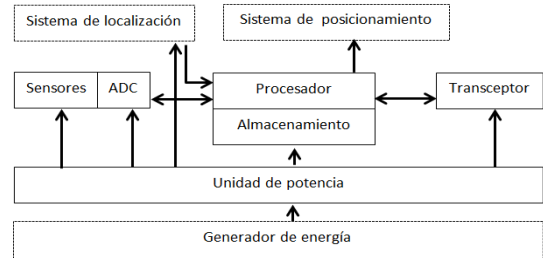


Figura 4. Mote. Componentes básicos.

La figura 5 muestra una línea de tiempo la cual fue extraída de la referencia [3] donde podemos resaltar las tecnologías con las que se ha venido trabajando.

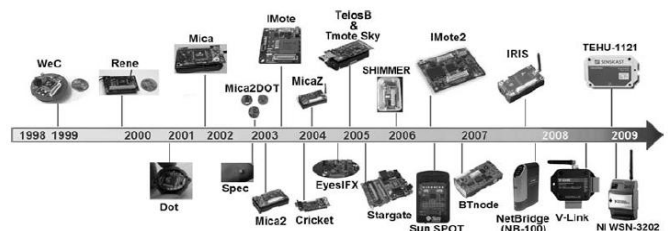


Figura 5. Mote. Línea de tiempo.

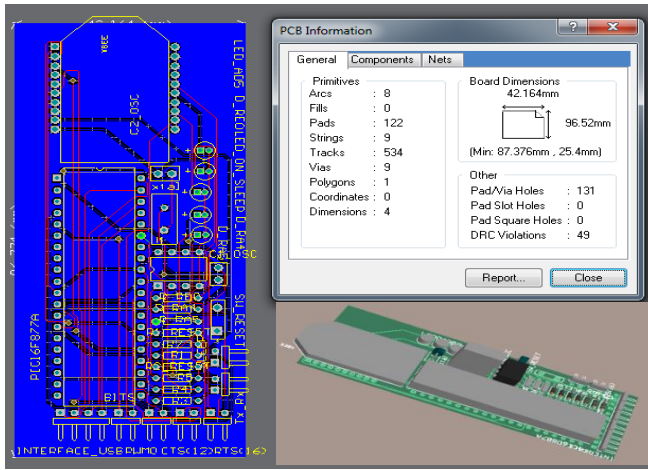


Figura 8. MXBee. Diagrama PBC y3D.

B. CAPA DE RED

El subsistema propuesto para la capa de red consta de los componentes TinyOS que se muestran en la figura 9 y que están basados en la aplicación Surge [12][13]. El protocolo Surge toma medidas de luz del ambiente y envía estas medidas sobre la red hacia la estación base. Usa administración de baja potencia. Surge forma un árbol con raíz en un solo nodo hacia el cual el resto de nodos renvían los paquetes. Cada nodo mantiene la dirección de su padre así como su profundidad en la red. Los nodos seleccionan su padre revisando los paquetes recibidos desde la menor profundidad en el árbol y la mejor calidad del enlace. Los nodos seleccionan un nuevo padre cuando la calidad del enlace sale del umbral establecido. Surge evita ciclos eliminando paquetes que ya han sido visitados con anterioridad. El tiempo de vida de un ciclo esta limitado por la tasa de muestras. Cuando un nodo dentro de un ciclo toma una lectura y la envía, el nodo pedirá descubrir y romper el ciclo de ruteo. Surge usa acuses AM (active messages) para proveer una forma de servicios de transporte confiable. Los nodos intentan retransmitir paquetes sin acuse varias veces y estiman la calidad del enlace para su padre así como la cantidad de mensajes de los cuales han recibido acuse. Se han eliminado componentes de *Surge* que no tienen funcionalidad para la aplicación abordada y que consumen una cantidad considerable de los recursos. Estos son *Leds*, *Sounder*, *Attr*, *ADCC*, *AttMag*, *Accel* y los componentes que envían comandos hacia a red como *Bcast*. El diagrama de componentes resultante para la propuesta del FARA se muestra en la figura 9.

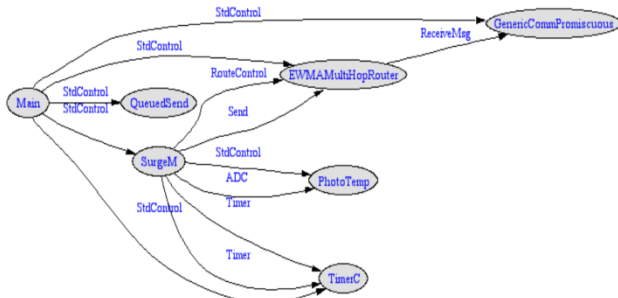


Figura 9. Componentes TinyOS del FARA.

La tabla 4 siguiente muestra las diferencias principales entre Surge y FARA además de las mejoras propuestas.

TABLA 4 COMPARACIÓN ENTRE SURGE Y FARA

Parámetros	Surge	FARA
Protocolo de ruteo:		
Reactivo	X	X
Proactivo	X	X
Componentes:		
Leds	X	
Sonido	X	
Magnetómetro	X	
Acelerómetro	X	
Luz	X	
Temperatura	X	X
Monitor de voltaje	X	X
Comandos:		
Downstream	X	X
Upstream	X	X
Adecuación de parámetros:		
Potencia adaptable		X
Intervalo de actualización de rutas		X
Intervalo de recolección de datos		X

Los mensajes involucrados en la propuesta de FARA son los que se muestran en la figura 10, 11 y 12. El primer mensaje es el que se obtiene directamente del canal de radio y que contiene los bytes de sincronía al inicio y final del paquete. Además, se incluye un identificador de tipo de paquete como puede ser paquete con o sin ACK, el acuse en sí y un tipo de paquete desconocido. La carga de datos usualmente es el mensaje TinyOS donde se encuentran los parámetros de la aplicación y va desde el byte 2 hasta n-1.

SYNC	Tipo	Payload	SYNC
0	1	2 ... n-1	n
0x7E	P_NO_ACK= 0x42 P_ACK = 0x41 ACK = 0x40 P_UNKNOWN = 0xFF	Mensaje TinyOS	0x7E

Figura 10. Raw Data Packet del FARA.

El mensaje TinyOS incluye la dirección del destino o si se envía en broadcast en los dos primeros bytes, el tipo de mensaje según la aplicación que en este caso sería Mensaje FARA Normal o Alarmado o inclusive el mensaje multihop en el tercer byte. El cuarto byte indica el grupo asignado al conjunto de nodos que forman la WNS, normalmente este valor es 125. El quinto byte define la longitud de los datos del tipo de mensaje y partir de este byte, están los datos. Finalmente, se tiene dos byte para el CRC de mensaje.

Dirección	Tipo	Grupo	Longitud	Datos	CRC
0	1	2	3	4	5 ... n-2
Broadcast = 0xFFFF UART = 0x007E ID_Nodo	FARA_N = 0x71 FARA_A = 0x72 MultiHop = 0xFA	0x7D		Mensaje FARA (Normal o Alarmado)	n-1

Figura 11. Mensaje TinyOS del FARA.

El mensaje FARA incluye en los primeros 4 bytes al nodo padre, seguido del nodo origen del mensaje y el número de secuencia. También se incluye un contador de saltos para evitar bucles en los bytes 12 y 13. Se tienen dos bytes que son usados como bandera de estado Normal o Alarmado. Los datos que utiliza la aplicación son el voltaje y la medida de temperatura como entradas para la toma de decisiones y establecimiento del estado de la red.

Padre	Origen	No. Secuencia	Contador saltos	Tipo	Batería	Temperatura
0 ... 3	4 ... 7	8 ... 11	12,13	14,15	16 ... 19	20,21

Figura 12. Componentes TinyOS del FARA.

C. CAPA DE APLICACIÓN

La capa de aplicación se compone de las interfaces de administración y visualización de la red inalámbrica de sensores. La primera se utilizará para programar los motes y forma parte de la estación base y la segunda permitirá monitorear el comportamiento de la red cuando se presenten alarmas. Inicialmente se propone el diseño de la ingeniería de software de la figura 13.

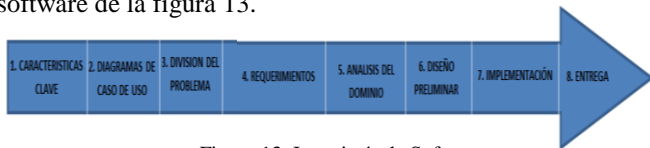


Figura 13. Ingeniería de Software.

A continuación, las figuras 14 y 15 muestran los casos de uso [14] propuestos para la interfaz de visualización y posteriormente la interfaz de administración de la WSN.

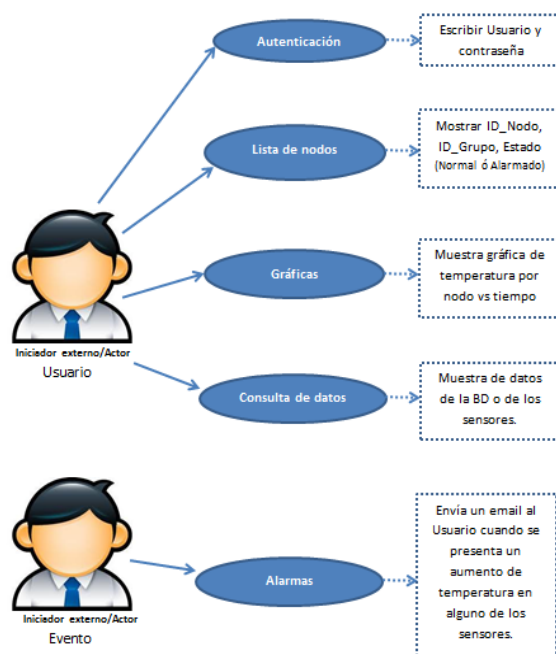


Figura 14. Caso de uso. Interfaz de visualización

Esta parte del proyecto se ha venido trabajando desde la ingeniería de software. Los lenguajes de programación involucrados son Java y XML. También, se pretende integrar mecanismos que simulen inteligencia en la etapa de recolección de datos.

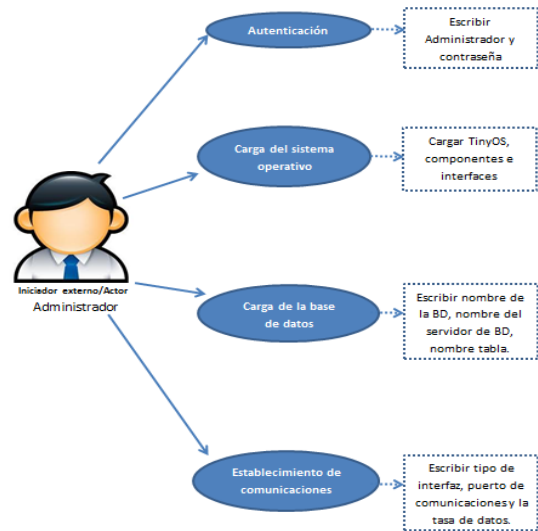


Figura 15. Caso de uso. Interfaz de administración

5. EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO

La probabilidad de recepción del enlace as figuras 16 y 17 muestran un ejemplo de la probabilidad de recepción en estado normal y alarmado para un escenario con combustible tipo matorral. Cabe señalar que se establecen tres regiones para caracterizar el comportamiento de mote. Se tiene la región efectiva con un alcance de hasta 8 metros en la cual se tiene una alta probabilidad de recepción (entre 0.8 y 0.9). La región de transitiva con una probabilidad de recepción (entre 1 y 0.1) y la región clara con una probabilidad de recepción nula o mínima (0.1 o menos). Estas pruebas se realizaron también para los escenarios de pastizal y copas. Los resultados finales se muestran en la tabla 5.

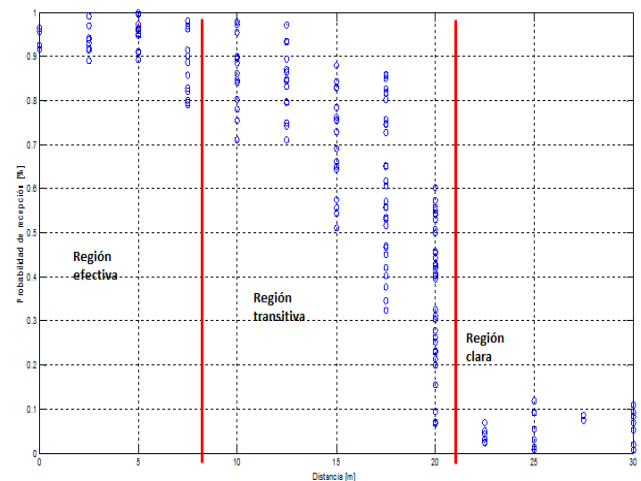


Figura 16. Probabilidad de recepción. Combustible: MATORRAL. Protocolo: FARA Estado de la WSN: Alarmado

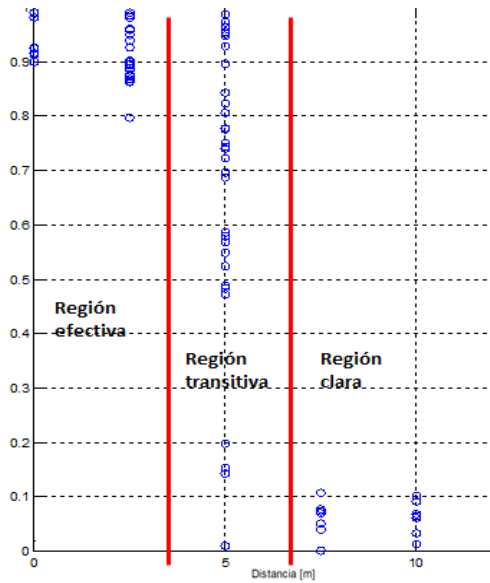


Figura 17. Probabilidad de recepción. Combustible: MATORRAL. Protocolo: FARA Estado de la WSN: Normal

TABLA 5. PROBABILIDAD DE RECEPCIÓN

Combustible	R. Efectiva		R. Transitiva		R. Clara	
	Normal	Alarmado	Normal	Alarmado	Normal	Alarmado
Pastizal	< 3 m	< 5 m	3 m < 8 m	5 m < 12 m	> 8 m	> 12 m
Matorral	< 4 m	< 8 m	4 m < 7 m	8 m < 22 m	> 10 m	> 22 m
Copas	< 10 m	< 25 m	25 m < 15 m	15 m < 40 m	> 15 m	> 40 m

A continuación, se obtiene el tiempo de vida de la red en base a los valores resultantes de la experimentación con los motes participantes en una WSN de 16 nodos. La figura 18 muestra la descarga de la batería del mote con respecto al número de paquetes recibidos durante una hora de observación. Se compara el protocolo FARA en estado Alarmado y Normal versus el algoritmo Surge.

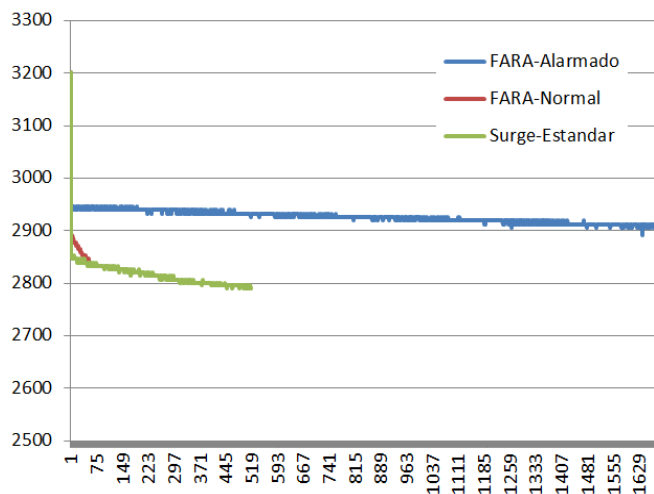


Figura 18. Descarga del mote (1 hr)

La tabla 6 muestra los resultados obtenidos experimentalmente y sus progresiones para aproximar la descarga hasta los 1.245 volts que es el valor mínimo para que el mote opere correctamente.

Protocolo	FARA				Surge	
Estado	Normal		Alarmado		Estándar	
Valor	Experimental	Aproximado	Experimental	Aproximado	Experimental	Aproximado
Mensajes x Hora	55	61	1692	2160	519	900
No. de mensajes aproximado hasta agotar recursos	68 732	81 776	121 824	155 520	58 080	72 000
Tiempo aproximado de vida del mote	NA	61.9 días	56.4 hrs	72 hrs	64.5 hrs	80 hrs

6. CALENDARIO DE ACTIVIDADES

No.	Actividad	Trimestre 13-I	Trimestre
1	Evaluar la plataforma ZigBee.		
2	Desarrollar y evaluar la plataforma MXBee.		
3	Comparar el desempeño Mica2, ZigBee y MXBee.		
4	Implementar y evaluar la WSN para incendios forestales propuesta.		
5	Comunicación de resultados.		
6	Escritura de la tesis.		

7. CONCLUSIONES

Los resultados de la experimentación con 16 motes Mica2 arrojaron resultados que se traducen en las siguientes conclusiones:

- Las estructuras de red predominantes son árbol, malla e híbridos.
- Para tener mayor alcance se puede aumentar la potencia de transmisión, aunque se debe encontrar el balance para una larga vida de la red.
- El tiempo de vida de la red aumenta con el protocolo FARA propuesto.
- Se propone una altura mínima de 1 metro para colocación de los motes, aunque a mayor altura se mejora el alcance.
- Se obtuvo un alcance aproximado de 20 metros en promedio entre los motes.
- Se propone el uso de 16 motes para cubrir una superficie de una hectárea.
- Se suprimirán los dispositivos y componentes no necesarios (p.ej. Leds y bocina).
- El tiempo de respuesta depende principalmente de la tecnología que se esté utilizando.
- También, se debe incluir el tiempo de contienda de los nodos en la capa MAC.
- El algoritmo FARA tarda unos pocos minutos (3-8) en la fase de reconocimiento. La llegada de datos una vez configuradas las tablas de ruteo solo tarda algunos segundos (1-5).
- Es conveniente colocar la estación base a mayor altura y en un lugar seguro o asignado directamente según las condiciones del medio.
- Se tiene una mayor conectividad de los nodos cuando se tiene la estación base en el centro en comparación de su ubicación en la perifería dejando menos nodos aislados.
- Se deben utilizar dos estaciones base, una en el centro y

otra en la periferia.

- Se pueden utilizar mecanismos que administren la potencia de transmisión para mejorar la conectividad cuando se tiene la estación base en la periferia.
- La conectividad de la red se ve afectada por la posición de la estación base. En el centro ofrece un mayor grado de conectividad y por lo tanto mejor tolerancia a fallas al tener caminos alternos cuando la calidad del enlace es mala o debido a la pérdida de nodos.
- La disponibilidad del sistema se puede mejorar si se tiene redundancia con dos estaciones bases replicadas debido a que se nota claramente la vulnerabilidad del sistema al depender de una sola.

Algunas de las aportaciones a la problemática abordada son las siguientes:

- La red se auto-reparar y auto-configurar y auto mantiene. Es decir, no necesita intervención humana una vez que se implementa en el escenario de prueba.
- El sistema es tolerante a fallas por pérdidas de nodos que hayan agotado sus recursos o que se dañen por la propagación del fuego.
- Los mecanismos propuestos que realizan comunicación intercapa prolongan la vida útil del sistema.

También se han observado algunas desventajas de los sistemas existentes mismas que serán oportunidades para el desarrollo de la propuesta de plataforma de hardware MXBee.

- Los tiempos de respuesta de los sistemas actuales deben ser mejorados con la solución propuesta para así poder ser aplicados a la problemática abordada.
- El uso de cantidades masivas de dispositivos no es posible debido a los costos actuales de las plataformas comerciales. Se pretende que la plataforma MXBee propuesta permita el uso real de la solución.

8. CALENDARIO DE ACTIVIDADES

NO.	ACTIVIDAD	PROYECTO DE INVESTIGACIÓN III			PROYECTO DE INVESTIGACIÓN IV		
1	Evaluar la plataforma Zigbee						
2	Desarrollar y evaluar la plataforma MXBee.						
3	Comparar el desempeño Mica2, ZigBee y MXBee						
4	Desarrollar la plataforma final						
5	Implementar la propuesta y evaluar su desempeño						
6	Comunicación de resultados						
7	Reporte escrito (tesis) de la versión final de la idónea comunicación de resultados						

9. REFERENCIAS

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci. Wireless Sensor Networks: A Survey. Computer Networks Journal, vol. 38, 2002, pp. 102-105.
- [2] A. Cerpa, J. Elson, D. Estrin, L. Girod, M. Hamilton, and J. Zhao, Habitat Monitoring: Application Driver for Wireless Communications Technology, 2001 ACM SIGCOMM Workshop on Data Communications In Latin America and the Caribbean, Seattle, Costa Rica, ACM Press, August 2001, pp. 20-41.
- [3] Wireless Sensor Networks. Ian F. Akyildiz, Mehmet Can Vuran. Ed Wiley 2010.
- [4] D. Estrin, R. Govindan, J. Heiderman, and S. Kumar, Next Century Challenges: Scalable Coordination in Sensor Networks, Proc. of ACM

MobiCom '99, Seattle, Washington, ACM Press, August 1999, pp. 263-270.

- [5] J. Kahn, R. Katz, and K. Pister, Next Century Challenges: Mobile Networking for Smart Dust, Proc. of ACM MobiCom '99, Seattle, Washington, ACM Press, August 1999, pp. 271-278.
- [6] La defensa contra incendios forestales: Fundamentos y experiencias, Ricardo Vélez, 2da Edición, Ed. Mc Graw Hill, 2009.
- [7] XMesh User's Manual. Revision D, April 2007. PN: 7430-0108-01. © 2005-2007 Crossbow Technology, Inc.
- [8] Evaluation of the XMesh Routing Protocol in Wireless Sensor Networks, Amos Teot, Gurminder Singh, and John C. McEachent, Department of Computer Science, Department of Electrical and Computer Engineering, Naval Postgraduate School, Monterey, California. 1-4244-01 73-9/06/\$20.00 ©2006 IEEE.
- [9] <http://openwsn.berkeley.edu/>
- [10] <http://www.moog-crossbow.com/>
- [11] www.digi.com
- [12] Maurer W, The Scientist and Engineer's Guide to TinyOS Programming, 2003.
- [13] UC Berkeley, TinyOS Documentation On line, September, 2003. <http://www.tinyos.net/tinyos-1.x/doc>.
- [14] Head First, Object-Oriented Analysis and Design, Brett D. McLaughlin, Gary Pollice, and David West, O'Reilly. November 2006, First Edition. (Prof. Roel Mtz)