

# Análisis de Desempeño de Redes de Sensores Inalámbricos en Tiempo Real Aplicadas a Monotorización Volcánica

Mario Gordon, Bryan Vásquez, Román Lara, y Rodolfo Gordillo,

**Resumen**—En este artículo se realiza el diseño, simulación e implementación en ambiente de laboratorio de las redes de sensores inalámbricos orientados a monitorización volcánica, a partir de un estudio de mercado se selecciona el hardware y software adecuado para esta aplicación, en base a los cuales se realiza una simulación e implementación, para analizar el desempeño de los equipos seleccionados en base al throughput y retardo resultante de ambas pruebas con la finalidad de determinar si son recomendables para monitorización volcánica.

**Index Terms**—WSN, Monitorización Volcánica, ns2, memsic, throughput, retardo, ZigBee, IEEE 802.15.4

## I. INTRODUCCIÓN

CON el desarrollo de las Tecnologías de la Información y Comunicaciones (TIC), las Redes de Sensores Inalámbricos (WSN), han tomado una importancia fundamental. La posibilidad de implementar dispositivos de bajo costo y elevada duración, sin mantenimiento preventivo periódico, capaces de obtener información del entorno y reenviarla de forma inalámbrica a un centro de coordinación, ofrece posibilidades inimaginables en multitud de aplicaciones. El principal objetivo de las WSN consiste en sustituir sensores de elevada complejidad (con costos elevados y limitados en número), y su infraestructura de comunicaciones asociada, por un conjunto mucho mayor de sensores más sencillos y eficientes que resultan considerablemente más económicos.

Los desastres producidos por la Naturaleza contribuyen hoy en día al deterioro del desarrollo sostenible de la sociedad tanto humana como económica. Cerca del 75% de la población mundial se encuentra en situación de riesgo provocados por fenómenos naturales. La pérdida de vidas humanas, la destrucción de medios de subsistencia y la devastación de áreas naturales son algunas de las secuelas que se revelan en aquellos países que se encuentran en regiones geográficas volcánicas. Es por esto que el acceso a la información es esencial en todas las fases derivadas de un desastre natural. En el presente proyecto se realiza un estudio que permite conocer las funcionalidades y desempeño en laboratorio de las WSN para aplicarlas en monitorización volcánica en tiempo real.

Como parte central del estudio se define un rango óptimo de sensores que maximizan el desempeño de la red, en base al análisis comparativo de los resultados obtenidos en las pruebas

Mario Emiliano Gordon, Bryan Sebastián Vásquez . Carrera de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Departamento de Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica del Ejercito ESPE, Sangolquí - Ecuador. E-mails: megordon2@espe.edu.ec, bsvasquez1@espe.edu.ec.

de simulación e implementación. Así como un análisis del desempeño de los equipos seleccionados para el desarrollo del proyecto.

Este artículo está organizado de la siguiente manera. En la sección II se describe el marco teórico que sustenta el funcionamiento de las WSN. En la sección III se detalla el estudio de mercado realizado para determinar el software y hardware más idóneo para el desarrollo del proyecto. En la sección IV se explica cuales fueron las pruebas realizadas en la simulación e implementación en ambiente de laboratorio. El análisis comparativo de los resultados de ambas pruebas así como las conclusiones, recomendaciones y propuestas futuras se detallan en los capítulos V y VI respectivamente.

## II. MARCO TEÓRICO

### II-A. Origen

Las Wireless Sensor Networks (WSN) nacieron como idea en al Universidad de Berkeley bajo una propuesta del Dr. Kris Pister. El enfoque de esta nueva idea, era reducir de manera exponencial los problemas que existían con las Redes de Sensores de la época que eran el gran consumo de potencia, equipos demasiado grandes y alto costo de implementación y mantenimiento.

### II-B. Transmisión de Información entre Dispositivos

El comportamiento de los equipos depende fundamentalmente de las características de hardware y software implementadas por el fabricante, pero la mayoría de los equipos de WSN basan el funcionamiento de transmisión de información entre dispositivos en el Protocolo de Red de Tiempo Sincronizado (Time Synchronize Mesh Protocol , TSMP) que tiene el siguiente funcionamiento, Figura.1 [6].

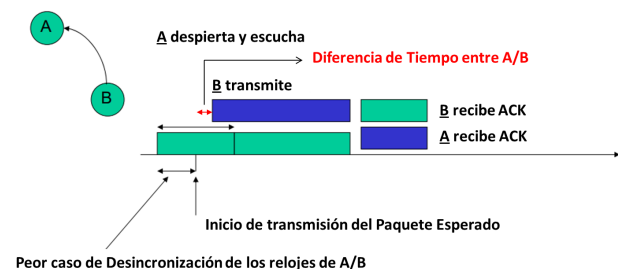


Figura 1. Comportamiento de dos Nodos al intercambiar mensajes

Durante todo este proceso intervienen varios subprocesos (propagación de la información, encriptación, confirmación de recepción, cambio de estado de Rx a Tx y de Tx a Rx, espera de recepción de paquete) que representan un incremento el retardo final como se observa en la fórmula (1), que es un tiempo relativamente pequeño pero que depende de la cantidad de nodos.

$$T_{slot} = T_{CCA} + 2 * T_g + T_{pckt} + T_{crypto} + T_{gACK} + T_{ACK} \approx 10ms \quad (1)$$

Como se puede observar en la Figura. 2, en caso de que una mota quiera enviar información al Gateway y no tenga un enlace directo para hacerlo, mediante el enrutamiento multi-salto conseguirá que su información sea procesada, pero necesitará de una mota intermedia que transmita sus datos, esto implica que la mota A envíe una supertrama que mientras más información de otras motas tenga, generará un retardo aun mayor. Por lo tanto la cantidad de dispositivos utilizados en una red no puede ser aleatorio y debe estar dentro de un rango que permita tener toda la información necesaria, sin saturar la red con un retardo excesivo [6].

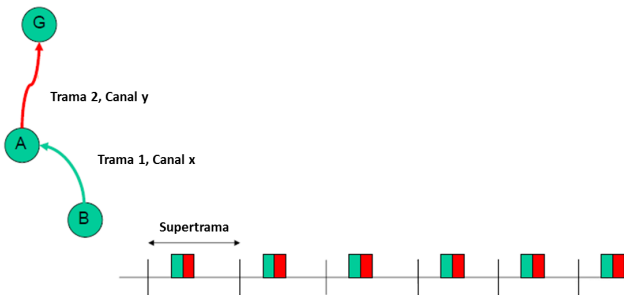


Figura 2. Transmisión de Paquetes hacia el Gateway Multisalto

### II-C. Relación entre ZigBee y el estándar IEEE 802.15.4

La relación entre ZigBee y el estándar IEEE 802.15.4 está basada en la arquitectura, la cual está definida en capas de ZigBee basadas en el modelo. Cada capa es responsable de ofrecer servicios para las capas superiores.

### II-D. Estándar IEEE 802.15.4

El grupo de trabajo IEEE 802.15 TG4 fue designado a investigar una solución de baja velocidad transferencia de datos, con batería de larga vida, que dure meses o años y muy baja complejidad, operando en una banda no licenciada [?].

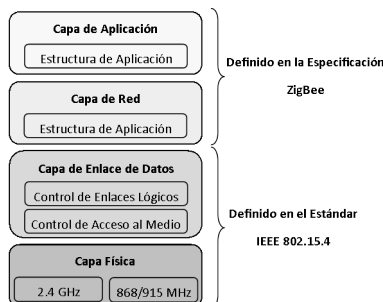


Figura 3. Modelo de referencia 802.15.4 y ZigBee

**II-D1. Capa Física:** Responsable de la transmisión y la recepción de datos en un canal de radio. Se utilizan radios con un espectro de dispersión de secuencia directa (DSSS).

La PHY de los 2.4 GHz, especifica operación en la banda industrial, médica y científica (ISM), que está disponible a nivel mundial, mientras que la banda 868 MHz está disponible en Europa y la banda de 915 MHz en Estados Unidos. En la figura 4, se puede ver la representación de los canales de radio y en la tabla I se enlistan algunas características de la capa física.

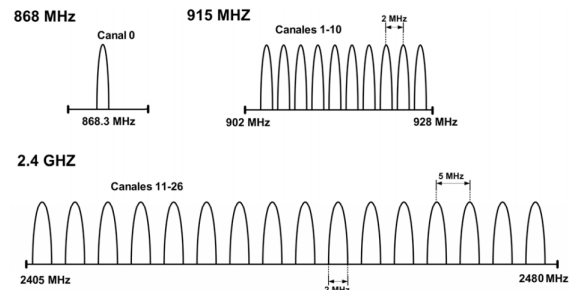


Figura 4. Bandas de frecuencias de operación en la capa física

Cuadro I  
PRINCIPALES PARÁMETROS DE LA CAPA FÍSICA

Frecuencia	868MHz	902-928MHz	2.4GHz
Tasa de datos	20 kbps	40kbps	250kbps
Canales	1	10	16
Potencia Tx	-3dBm	-3dBm	-3dBm
Sensibilidad Rx	-92dBm	-92dBm	-85dBm

**II-D2. Capa de Enlace de Datos :** El proyecto IEEE 802 divide al DLL (*Data Link Layer*, DLL) en dos subcapas, la subcapa de enlace de acceso a medios (*Medium Access Control*, MAC) y la de control de enlaces lógicos (*Logical Link Control*, LLC). El LLC es común a todos estándares 802, mientras que la subcapa MAC depende del hardware y varía respecto a la implementación física de esta capa.

Las características del MAC IEEE 802.15.4 son: la asociación y la disociación, reconocimientos de entrega de trama, mecanismos de acceso al canal, validación de trama, garantía del manejo de las ranuras de tiempo, y manejo de guías.

### Tipos de Dispositivos

La red de Zigbee define tres tipos diferentes de dispositivos según su papel en ella:

- **Coordinador ZigBee (ZC):** Puede actuar como administrador de una red en árbol así como servir de enlace a otras redes. Existe solo un coordinador por cada red.
- **Router ZigBee (ZR):** Además de ofrecer un nivel de aplicación para la ejecución de código de usuario, puede actuar como router interconectando dispositivos separados en la topología de la red.
- **Dispositivo final (ZED):** Posee la funcionalidad necesaria para comunicarse con su nodo padre (el coordinador o un router), pero no puede transmitir información destinada

a otros ZED. Este tipo de nodo puede estar dormido la mayor parte del tiempo, aumentando la vida de sus baterías.

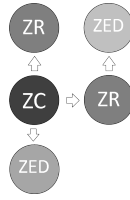


Figura 5. Tipos de dispositivos en red ZigBee

En base a su funcionalidad puede plantearse una segunda clasificación:

- *Dispositivo de funcionalidad completa (FFD)*: Puede funcionar como coordinador o router, o puede ser usado en dispositivos de red que actúen de interface con los usuarios.
- *Dispositivo de funcionalidad reducida (RFD)*: Tiene capacidad y funcionalidad limitadas, con el objetivo de conseguir un bajo coste y una gran simplicidad. Básicamente, son los sensores/actuadores de la red.

### II-E. ZigBee

Una de las razones para usar esta tecnología inalámbrica es la reducción en los gastos de instalación, ya que no es necesario realizar el cableado. Esta tendencia es impulsada por la gran capacidad de integrar componentes inalámbricos de forma más barata.

*Capa de Red*: Une o separa dispositivos a través del controlador de red, implementa seguridad, y encamina tramas a sus respectivos destinos. Además, el controlador de red es responsable de crear una nueva red y asignar direcciones a los dispositivos de la misma. La capa de red soporta múltiples configuraciones de red.

*Capa de Aplicación*: Es el ambiente en el cual se encuentran los objetos de aplicación, mismos que envían y reciben datos a través de un ente de datos APS por medio de un servicio de acceso de punto

## III. MÉTODOS Y MATERIALES

### III-A. Hardware

La cantidad de equipos que existen en el Mercado para aplicaciones de Redes de Sensores Inalámbricos es innumerable, es por eso que es necesario determinar cuales son las empresas más relevantes que brinden no solo los equipos, sino también facilidades como: envío rápido, trámite de aduana y legal rápido, garantía en los equipos, asesoría técnica, entre otras. Es por esto que se realiza un análisis a fondo de las principales empresas proveedoras de Hardware para WSN y se presenta la Tabla. II comparativa, la cual brinda información clara de las razones por las que se seleccionó a la empresa MEMSIC.

Los equipos MEMSIC utilizan redes tipo Mesh, todos los sistemas tipo mesh inalámbricos comparten las siguientes características: Bajo consumo de Potencia, Facilidades de Uso,

Cuadro II  
RESULTADOS DE CALIFICACIÓN DE LOS EQUIPOS

Empresa Proveedora	Dust Networks	Crossbow, MEMSIC	National Instruments	Libelium
Documentación Disponible	0	5	5	5
Interfaz de Administración	5	5	0	5
Disponibilidad de Equipos	0	5	0	0
Código Fuente Abierto	0	0	2,5	5
Diversidad de Sensores	0	5	2,5	5
Protocolo De Enrutamiento	0	5	2,5	2,5
Promedio	0,833	4,167	2,083	3,75

Escalabilidad, Sensibilidad, Rango, Comunicación Bidireccional, Confiabilidad, Pequeño Módulo de factor de Forma. La descripción detallada de estas características se detalla en [4].

Xmesh es un protocolo completo de enrutamiento multi-salto, ad hoc desarrollado por Crossbow para redes inalámbricas. Una red Xmesh consiste de nodos (Motas) que se comunican inalámbricamente entre si y son capaces de pasar mensajes de radio a una estación base donde son procesados por la PC y enviados a un cliente. Xmesh además provee el servicio de redes TrueXmesh que es auto organizable y auto regenerable. Provee calidad de servicio (QoS) y además puede ser configurada en varios modos de potencia, Alta Potencia (HP High Power), Baja Potencia (LP Low Power) y ELP(Baja Potencia Extendida Extended Low Power). Para nuestra aplicación, que es necesario realizarla en tiempo real el modo HP es el idóneo de acuerdo a las siguientes razones.

En el Modo Xmesh - HP los nodos están continuamente prendidos, consume entre 15 y 30 mA, dependiendo del tipo de mota, las mismas pueden recibir y transmitir mensajes a cualquier tiempo. Los mensajes de actualización de ruta y de estado son enviados a una tasa de transmisión mayor lo que hace que el tiempo para formar la malla o para añadir una mota sea menor. Consume un alto ancho de banda con baja latencia, tiene una ocupación completa del canal y soporta la característica TrueMesh. El problema que presenta esta configuración es que el consumo de baterías es alto y deben ser reemplazadas aproximadamente cada cinco días.

### III-B. Software de Simulación

La simulaciones asistidas por ordenador modelan objetos o actividades hipotéticas o de la vida real, permitiendo estudiar cómo funciona un sistema si se eligen adecuadamente los parámetros que lo caracterizan.

*III-B1. Justificación de elección del Simulador de red:* Cada simulador tiene un rango variado de desempeño dependiendo de la aplicación y en consecuencia la elección del simulador estará basado en la aplicación o estudio que se desee realizar. Además, ningún software de simulación para WSN es perfecto, ya que estos no toman en cuenta muchas de las variables que se pueden tener en el medio ambiente. Por lo tanto, depende mucho el propósito de estudio para escoger un simulador. Para elegir el mejor simulador para este proyecto

se va a evaluar algunos aspectos que serán muy importantes en el desarrollo de las simulaciones, los cuales son: Orientado a WSN, Extensiones framework específicas, Documentación, Soporte técnico, Costo.

Cuadro III  
ASPECTOS DE EVALUACIÓN DEL SOFTWARE

Parámetros	ns-2	OMNET	Castalia	J-Sim	TOSSim
Orientado a WSN	4	2	4	3	5
Extensiones framework específicas	4	3	1	1	1
Documentación	4	3	2	2	3
Soporte técnico	2	3	2	2	2
Costo	2	1	2	2	2
Total	16	12	11	10	13

Realizando evaluación de los simuladores seleccionados para realizar las pruebas para WSN se obtuvo un mayor puntaje para ns-2, esto se debe a que cumplió las necesidades que se requiere para el presente proyecto. Otra razón por lo que se elige ns-2 para el desarrollo de simulaciones de este proyecto es el amplio uso en el mundo académico y de investigación en una amplia variedad de aplicaciones de red tanto cableadas como inalámbricas, constituyendo un estándar para la investigación, por lo que existe una gran cantidad de artículos técnicos que realizan estudios, experimentos y pruebas de desempeño en WSN. Además, se tiene una amplia experiencia con este simulador, con el conocimiento adquirido en trabajos previos realizados en el Departamento de Eléctrica y Electrónica de la ESPE.

### III-C. Estudio de las topologías

La definición topología se refiere a la configuración de los componentes hardware, y como los datos son transmitidos a través de esa configuración. La topología es generalmente cambiante para las redes de sensores Ad Hoc, los nodos se despliegan de manera aleatoria.

En la tabla IV se resume las características principales de las topologías usadas en IEEE 802.15.4/ZigBee. Se debe recordar que las redes de estrella y árbol basadas en clúster pueden operar en modo *beacon* habilitado, lo cual puede proporcionar garantías de recursos predecibles como el ancho de banda, el tamaño de *buffer*, sincronización de la red y conservación de energía.

Cuadro IV  
CARACTERÍSTICAS DE LAS TOPOLOGÍAS

Características	Estrella	Malla	Árbol de clúster
Escalabilidad	no	sí	sí
Eficiencia energética	sí	no	sí
Sincronización de la red	sí	no	sí
Redundancia de caminos	no	sí	no
Movilidad de nodos	parcial	sí	parcial
Enrutamiento determinístico	sí	no	sí

Para el presente proyecto se debe toma en cuenta la topología más adecuada para la aplicación de monitorización volcánica, la topología tipo malla tiene buenas características de desempeño lo cual favorecerá la optimización de tiempos en la red.

### III-D. Diseño y Justificación

*Modelado por Teselación:* Para formar una red regular que facilite la interpretación de resultados y que la conexión entre los nodos sea homogénea se utiliza el concepto de teselación. Teselación se define como el embaledado con polígonos regulares. Las teselaciones se pueden especificar mediante la notación de *Schlafl* [1].

Con el fin de simplificar los cálculos, se introduce el concepto de capa. Una capa es la agrupación de nodos de manera concéntrica a diferentes profundidades respecto al nodo central, estando la primera capa formada por los  $A$  nodos adyacentes a ese nodo central. La Figura 6 muestra gráficamente el concepto de agrupación por capas concéntricas para las teselaciones  $\{3,6\}$ .

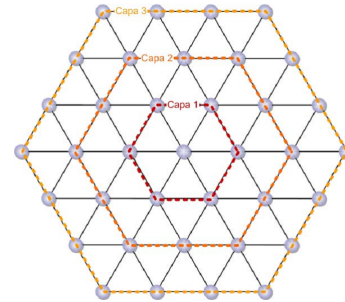


Figura 6. Teselación regular formada por triángulos equiláteros

El número de nodos  $N$  de una topología se puede extraer en función del número de capas  $C$ . A partir de este número de capas  $C$ , se tienen diferentes formulaciones para las teselaciones formadas por triángulos equiláteros (2).

$$N = 1 + 3C(C + 1) \quad (2)$$

Analizadas las topologías existentes se opta por usar este tipo de modelado de topología, ya que con ello se facilita considerablemente la interpretación de los resultados y permite una conexión homogénea entre los nodos de la red. Para realizar pruebas de desempeño de red tanto en el simulador como implementando en un ambiente de laboratorio, se opta por elegir la topología por teselación triangular como patrón de red, esto se debe a que esta topología ofrece un número de caminos adecuados, que facilitarán la comunicación entre los dispositivos, además los nodos en la red tienen la misma distancia entre ellos y hacia el coordinador, por lo cual los tiempos de propagación de la información entre los nodos serán semejantes y se obtendrán mejores resultados.

## IV. PRUEBAS Y MEDICIONES

### IV-A. Simulación de la topología de Red

*IV-A1. Implementación del Diseño:* Los parámetros adecuados para la simulación red de sensores inalámbricos se encuentran muy bien detallados en [2], lo cual ayuda a realizar una correcta programación del ambiente a simular en ns-2 y a establecer los parámetros óptimos para este tipo de tecnología.

En las tablas V, VI y VII se detallan los parámetros generales, de potencia y de los nodos usados para la simulación del modelo a implementar.

Cuadro V  
PARÁMETROS GENERALES

Parámetro	Valor
Modelo de Radio Propagación	Two-Ray Ground
Tecnología inalámbrica	IEEE 802.15.4
Protocolo de enrutamiento	AODV
Tasa de transmisión	250 kbps
Frecuencia de transmisión	2.4 GHz
Tipo de antena	Omnidireccional
Tiempo de simulación	240 seg

Cuadro VI  
PARÁMETROS DE POTENCIA

Parámetro	Valor
Potencia de transmisión	0 dBm (1mW)
Sensibilidad	-94 dBm
Ganancia antena transmisora Gt (dB)	1.0
Ganancia antena receptora Gr (dB)	1.0
Pérdidas por trayectoria(dB)	1.0

Cuadro VII  
PARÁMETROS DE LOS NODOS

Parámetro	Valor
Tipo de tráfico	FTP
Dirección del tráfico	Todos al Coordinador
Tamaño del paquete	55 bytes
Número de coordinadores	1 coordinador
Distancia entre nodos	30m
Número de nodos	Desde 6 hasta 36 nodos
Beacon mode	Enabled Beacon Order:3 Superframe Order:3

En la figura 7, se puede observar la implementación en el software de simulación, para obtener los resultados de pruebas de rendimiento de red y comprobar el funcionamiento con un número óptimo de sensores se empezó simulando desde la primera capa de teselación aumentando nodo por nodo hasta llegar hasta la tercera capa, con lo cual se observó que ya caía el desempeño de la red.

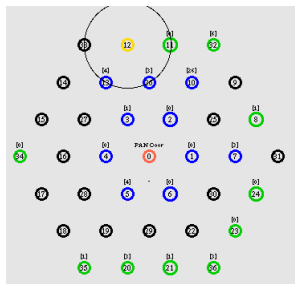


Figura 7. Ejecución de la simulación

A partir de los resultados obtenidos se puede analizar el rendimiento de la red y la cantidad de paquetes perdidos. Para

determinar el throughput de la red se usa la ecuación (3). Con esto, se puede realizar un análisis de resultados de acuerdo a las gráficas obtenidas con los valores de las simulaciones.

$$\text{Throughput de la red} = \frac{8 \times \text{Número de bytes}}{\text{Tiempo de simulación}} \left[ \frac{\text{bits}}{\text{s}} \right] \quad (3)$$

Con la ayuda de un software matemático se puede realizar una interpolación de los resultados obtenidos del *throughput* y el *delay*, obteniendo como resultado una ecuación de tercer grado, (4) para el *throughput* y (5) para el *delay* de la red. En las figuras 8 y 9 se puede visualizar los puntos obtenidos de la simulación y la curva de obtenida del *throughput* y el *delay*, con la cual se puede analizar el comportamiento de la red y comparar con los resultados obtenidos en la implementación.

$$f(x) = -3,979x^3 + 167,2x^2 - 2373x + 138000 \quad (4)$$

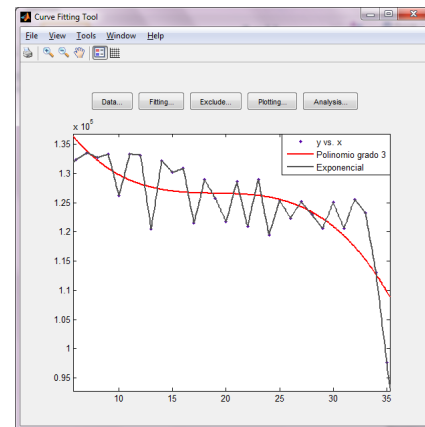


Figura 8. Función polinomial grado 3 para el throughput de la red

$$f(x) = 2,984e^{-6}x^3 - 0,0001688x^2 + 0,005914x - 0,01433 \quad (5)$$

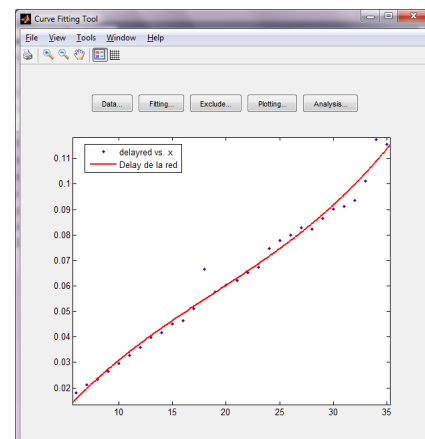


Figura 9. Función polinomial grado 3 para el delay de la red

#### IV-B. Implementación de la Topología en Ambiente de Laboratorio

Después de una configuración previa de acuerdo a las características necesarias para nuestra aplicación, para analizar el desempeño real de los equipos se realizaron tres pruebas con diferentes características con el fin de determinar su comportamiento.

A diferencia de la simulación, en la realidad la mayoría de las veces no es posible desplegar una red de acuerdo a nuestras necesidades y mucho menos con una forma geométrica exacta como en la topología por teselación triangular. Específicamente, cuando nos referimos a monitorización volcánica, el terreno no nos permite desplegar una red uniforme a menos que se invierta en la instalación de torres implementadas únicamente para la red, lo que resulta extremadamente costoso. Es por eso que las pruebas fueron realizadas con una topología aleatoria en la cual se obtuvieron excelentes resultados, sin embargo lo más recomendable es utilizar una topología triangular para maximizar el desempeño de la red.

La primera prueba se realizó en un ambiente cerrado, el área seleccionada fue el laboratorio de Investigación y Desarrollo de la Escuela Politécnica del Ejército. El área tiene características óptimas al poder ubicar los sensores con línea de vista entre ellos además, que al ser un área pequeña no puede existir una gran separación entre cada mota.

La segunda prueba fue realizada en la parte posterior de los laboratorios de Electrónica como se puede observar en la Figura. 10. Se cubrió un área de  $3596 m^2$ . A diferencia del primer escenario, las características de propagación existentes fueron las más exigentes. Al ser ubicados los sensores a nivel del suelo, con una línea de vista que aparentemente existía y permitía tener comunicación entre los dispositivos, no existía el despejamiento suficiente en los enlaces y fue necesario elevar la altitud de ciertas motas para que permitan tener conectividad en la red.



Figura 10. Topología de Red Implementada en Exteriores No.1

Finalmente, la última prueba fue realizada en la terraza del Laboratorio de Electrónica como se observa en la Figura. 11. A pesar de que esta prueba también fue en exteriores, las características fueron diferentes ya que los equipos fueron colocados a una altura considerable y por lo tanto tenían mejores características de propagación. El área cubierta fue de  $2646 m^2$ .



Figura 11. Topología de Red Implementada en Exteriores No.2

En todos los escenarios se realizaron pruebas con 1, 5, 10, 15 y 20 motas con el objetivo de determinar si existe variaciones en el comportamiento de los equipos, software y red; al aumentar la extensión de la topología. En cada una de estas pruebas se adquirieron mediciones a través del software proporcionado por MEMSIC (XSniffer [4] y MoteView [3]).

## V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### V-A. Análisis de resultados de la Simulación

La curva del *throughput*, ver figura 12, muestra claramente que a mayor número de nodos el desempeño de la red baja, ya que existe un solo nodo receptor que maneja toda la información que se transmite en la red, este es el nodo coordinador. Existe un rango en la curva obtenida en que el *throughput* se estabiliza, este valor es entre 15 y 24 nodos, superior a este número de dispositivos el tráfico de la red se satura y el *throughput* empieza a decaer hasta hacerse cero, además el rendimiento de la red se hace cero al superar los 50 dispositivos. Obviamente, al tener menor número de nodos enviando información al coordinador el canal va a estar menos saturado, por lo cual el número de paquetes caídos va a ser mínimo.

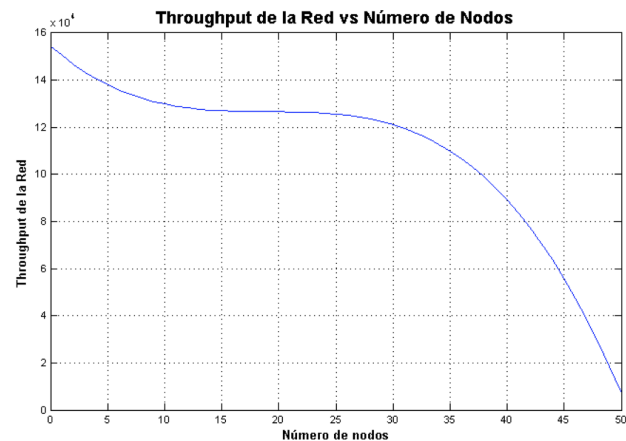


Figura 12. Throughput de la red vs número de nodos

El número de paquetes caídos en la red es muy alto y aumenta conforme se incrementa el número de nodos.

Esto es debido a que los dispositivos están alerta de los paquetes *beacon* que son transmitidos por el coordinador periódicamente. Debido a esto la gran cantidad de paquetes de control generados se colisionan resultando una gran cantidad de paquetes caídos.

Analizando la curva del *throughput* se puede afirmar que el número adecuado de nodos a implementarse en monitorización volcánica debe oscilar entre 10 y 20, de esta manera el retardo y el *throughput* de la red serán óptimos para una monitorización en tiempo real al no existir saturación de la red. Haciendo una comparación del *Throughput* en la simulación en el rango de 10 a 20 sensores se puede decir que una cantidad óptima de nodos sensores en una red es 15, ya que tiene un valor de desempeño adecuado y además la red con esta cantidad de motas podrá adquirir más datos y cubrir una área mayor con un buen desempeño de la red.

*V-B. Análisis de resultados de la Implementación en Ambiente de Laboratorio*

El análisis de la implementación se realizará en tres diferentes conceptos con el fin de determinar cual fue el desempeño de los equipos:

**1. Análisis de desempeño de los equipos de acuerdo al ambiente de Implementación**

Se determinó en base al análisis de los resultados de cada una de las pruebas que el ambiente de implementación tiene influencia determinante en la cantidad de paquetes perdidos y retransmitidos. Esto se debe a que mientras menor calidad tenga el enlace con características de propagación bajas, los equipos necesitan de mas esfuerzo para lograr que sus paquetes lleguen a su destino. Es por eso que en el escenario de interiores como se observa en las Figuras. ??, ??, tiene en general, la menor cantidad de paquetes perdidos y retransmitidos; seguido del escenario en exteriores No.2 donde las características de propagación no eran las ideales, pero los equipos tenían una buena línea de vista. Y por último el escenario en exteriores No.1 donde las características de propagación fueron las más exigentes y por ende se obtuvieron los peores resultados.

**2. Análisis de desempeño de los equipos de acuerdo a la cantidad de nodos utilizados**

Se determinó en base al análisis de resultados que la variable que influye en el incremento de retardos en la red y en la disminución de desempeño del software es la cantidad de número de nodos. El análisis se realizo en base a dos tiempos como se puede observar en la Figura. 13: el primero que es el tiempo entre muestras observadas por el software (independientemente del nodo que produzca la información) y el segundo el retardo que existe en un nodo de la red (tiempo transcurrido para observar otra muestra del mismo nodo).

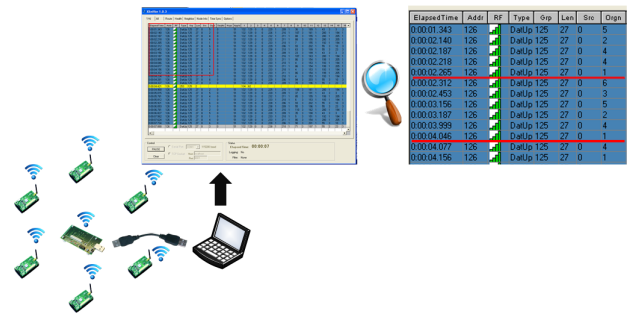


Figura 13. Diferencia entre Retardo y Tiempo de Adquisición del Software

Se observa claramente en las Figuras. 14, 15, que los tiempos se incrementan hasta llegar a un punto máximo de saturación en donde ya no se puede añadir mas nodos. Esto se debe a que a que el trafico que circula por la red es demasiado alto y consecuentemente el Gateway no puede procesar la información entrante con la misma velocidad que cuando son pocos los nodos que están enviando información.

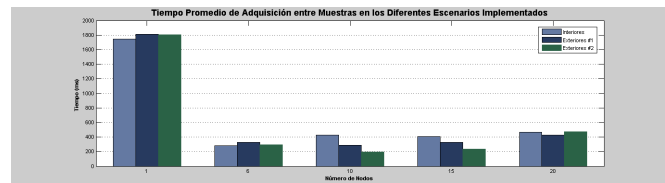


Figura 14. Tiempo de Adquisición entre Muestras del Software

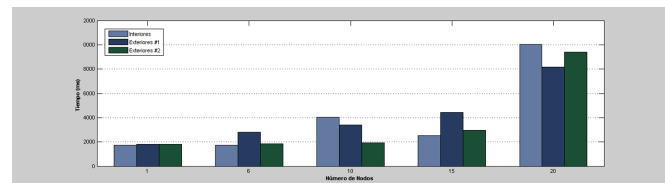


Figura 15. Retardo Promedio de un Nodo Especifico de la Red

La Figura. 15 grafica de mejor manera como la evolución de la red aumenta el retardo de la misma y al sacar un promedio del retardo de todos los nodos de la red, se obtiene la siguiente Tabla. VIII. En base a la misma se afirma que la cantidad máxima de nodos que puede soportar la red esta entre 15 y 20.

Cuadro VIII  
RETARDO PROMEDIO DE LA IMPLEMENTACIÓN EN AMBIENTE REAL

Cantidad de Nodos	Retardo Promedio
1	1787,189
6	2128,794
10	3112,028
15	3306,138
20	9208,811

Debido a que el objetivo del estudio es determinar un rango de equipos que permite realizar monitorización volcánica, se analizó el *throughput* de la red en base al porcentaje promedio de paquetes exitosamente enviados

(adquiridos por el software de monitorización) en base a la fórmulas.

$$\eta = \frac{(\%InformacionSensores) * 48Bytes * 8}{TiempoNecesarioParaEnviarElPaquete} (bits/sec) \tag{6}$$

$$\eta_o = \frac{\eta}{250kbps} \tag{7}$$

Si observamos la Figura. 16 se observa que el throughput normalizado para 10 nodos es mayor que para 6, de esta manera se afirma que la cantidad mínima de motas recomendadas para monitorización volcánica es de 10 ya que se tiene, mayor cobertura que una mota (tiene mayor throughput) y un mayor throughput que 6 motas.

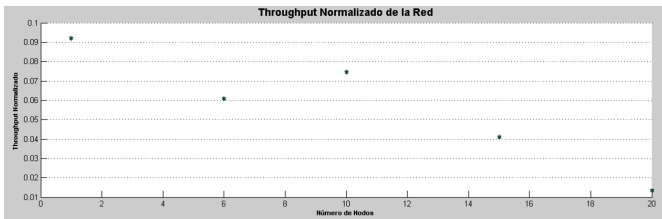


Figura 16. Throughput Normalizado de la Red

### 3. Análisis de desempeño de los equipos de acuerdo a su Distancia

En cuanto al desempeño por su distancia, los equipos cumplen con sus especificaciones de fabrica siempre y cuando estén trabajando en condiciones ideales es decir, características de propagación óptimas en los enlaces, caso contrario los equipos no funcionarían de manera adecuada.

#### V-C. Comparación Throughput Normalizado y Retardo

Para realizar la comparación de los resultados obtenidos en ambas pruebas sacaremos el Throughput Normalizado y el Retardo Promedio de la red de los diferentes escenarios implementados, estos datos los usaremos para determinar las diferencias que existen con la simulación y determinar el factor de multiplicación que nos permitirá modelar el comportamiento de los sensores para aplicarlos en monitorización volcánica.

Como se puede observar en la Figura. 17 los resultados obtenidos no son comparables y esto se debe a que en la simulación no se puede añadir características intrínsecas de los equipos que hacen que, en la realidad, el throughput de la red disminuya.

Al multiplicar al modelo obtenido en la simulación por un factor de 0.125 se obtiene la Figura. 18, en donde podemos observar que el comportamiento obtenido es similar y por lo tanto podemos utilizar el modelo modificado para predecir de cierta manera, como va a ser el funcionamiento de los equipos en la realidad

En cuanto a la comparación del Retardo, en la Figura. 19 observamos que el tiempo graficado está variando entre 2.5 y 4.5 ms. Sin embargo tenemos que considerar que el tiempo

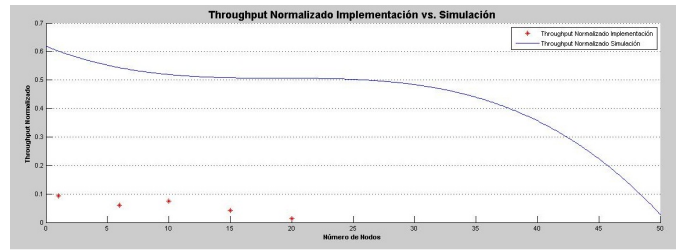


Figura 17. Comparación Throughput Implementación vs. Simulación

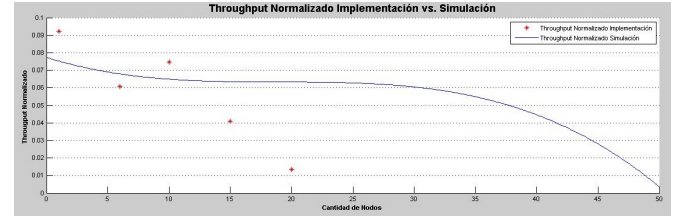


Figura 18. Comparación Throughput Modificado

obtenido en la simulación es el tiempo de transmisión y no el retardo que fue el que obtuvimos en la implementación, es por eso que al compararlos (Figura. 20 ), no existe relación alguna entre ellos. Es por esto que es necesario multiplicar al modelo por un factor que permitirá considerar las variables características de los equipos que no pueden ser incluidas en la programación de la simulación.

Sin embargo si queremos justificar el tiempo de transmisión obtenido en la simulación, en el manual [5] podemos observar que el tiempo obtenido en pruebas realizadas por la empresa es de 4ms al igual que en lo obtenido en la simulación.

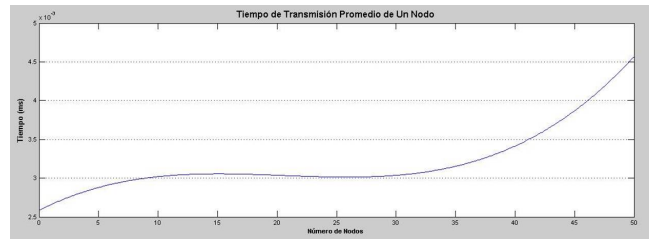


Figura 19. Tiempo de Transmisión de Un Nodo de la Red, Simulación

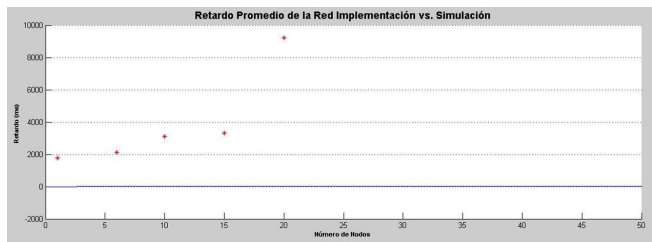


Figura 20. Comparación Retardo Implementación vs. Simulación

Si multiplicamos al modelo por un factor de 100000 obtenemos la Figura. 21 en donde se observa que el comportamiento de la simulación e implementación es similar. Por lo tanto se puede afirmar que el modelo modificado es útil para predecir el comportamiento de los equipos en la realidad.



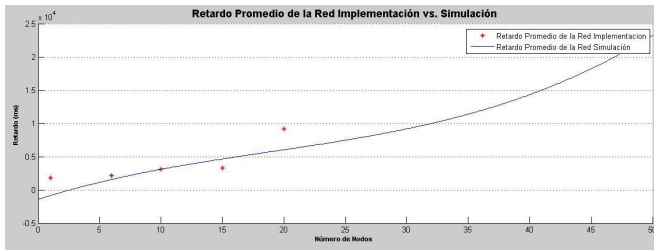


Figura 21. Comparación Retardo Modificado

En base a los resultados obtenidos y a su debida comparación, no podemos recomendar estos equipos para monitorización volcánica debido a que su desempeño en la realidad es muy bajo (Throughput por debajo del 10%), por las características propias de los equipos y que al no tener software abierto no permiten personalizarlos a nuestra aplicación y por ende mejorar su desempeño. A pesar de esto en base a lo estudiado se puede recomendar un rango de motas, entre 10 y 20, con las cuales se obtendrá un trabajo adecuado en monitorización volcánica sin saturar excesivamente la red.

## VI. DISCUSIÓN

### VI-A. Conclusiones

La respuesta de los equipos actuales ante estos sucesos son demasiado lentas y costosas, por lo que resulta fundamental realizar una monitorización en tiempo real, con el fabricante que supla las características adversas de una erupción volcánica y con la cantidad de equipos óptimos que no hagan que la red sea ineficiente pero que la inversión tampoco sea excesiva.

Las características físicas de las redes de sensores inalámbricos (tamaño pequeño, bajo consumo energético, alta autonomía, escalabilidad de sensores, bajo costo, facilidad de instalación) así como la tecnología con la que trabajan (Zig-Bee, 802.15.4); hacen que estos equipos sean óptimos para aplicarlos en monitorización volcánica.

La topología por teselación triangular es la topología que mejores características presenta para este tipo de aplicaciones, sin embargo en la implementación real, reproducir la topología diseñada no es aplicable físicamente debido a las características del terreno volcánico, sin embargo se implementó una topología aleatoria en la cual la primera capa tiene la forma de la topología triangular brinda un buen desempeño.

Se comparó los resultados obtenidos en ambas pruebas y se concluyó que a pesar de que los equipos físicamente trabajan de manera adecuada, sus problemas intrínsecos no permiten recomendarlos para monitorización volcánica, ya que al analizar el Throughput se determinó que este es demasiado bajo, y al no trabajar con código abierto no permiten personalizarlos para aumentar su desempeño.

Se comparó los resultados normalizados de las pruebas después del modelamiento y se observó que el comportamiento es similar, sin embargo el factor de corrección utilizado es demasiado alto (especialmente para el retardo), lo que determina que las características propias de los equipos (tiempo de procesamiento en la mota y gateway, baja respuesta del software utilizado para la monitorización, información innecesaria

enviada en la trama de datos) también influyen en el retardo y hacen que los resultados simulados y reales sean diferentes.

En base a lo comparado se concluyó que el rango óptimo de equipos es de 10 (mayor throughput pero menor área cubierta) a 20 sensores (throughput mínimo pero mayor área cubierta).

### VI-B. Recomendaciones

Los estudios realizados sobre topologías para WSN aun no han sido revisados a fondo por lo que es aconsejable basar este estudio en las redes ad-hoc de las cuales existen varios trabajos y son la base de funcionamiento de las WSN.

Existen varios programas desarrollados para el análisis de WSN en ns-2, pero es necesario comprobar su desempeño antes de tomarlos como validos. Se aconseja realizar un análisis a fondo de estos programas para determinar si están trabajando de la manera deseada y en caso de que no lo estén haciendo, realizar las modificaciones necesarias.

La mayoría de veces los resultados obtenidos en las simulaciones e implementaciones tienen grandes diferencias por lo que se recomienda utilizar herramientas de software que permiten realizar las comparaciones de manera mas comprensible para la detección de las acciones correctivas necesarias.

### VI-C. Trabajos Futuros

En base al estudio realizado con los equipos MEMSIC se determinó que el hecho de trabajar con software propietario limita al usuario desarrollar aplicaciones personalizadas, ya que el software es demasiado general y envía información que para la monitorización volcánica no es necesaria. Debido a esto se recomienda que en próximos estudios se utilicen equipos Open Source que permitan desarrollarlos de acuerdo a las necesidades del proyecto.

Al realizar la implementación de campo se comprobó que si se desea trabajar en tiempo real el consumo de baterías es excesivo por lo que se recomienda realizar un estudio sobre implementación de energías alternativas como paneles solares que aumenten la autonomía de los equipos. En este estudio también se recomendaría determinar si la implementación de los paneles soporta una monitorización en tiempo real y cual es la dirección e inclinación óptima que maximice su desempeño.

La versatilidad que brindan las WSN permite aplicarlas en varias aplicaciones, una de las que mejor se acoplaría a la realidad que vive nuestro país sería la monitorización de bosques protegidos para disminuir los efectos de los incendios forestales. También se podría utilizar las WSN para realizar un estudio de la toxicidad del aire en las áreas donde existe gran cantidad de personas en las horas pico, con el objetivo de determinar de que manera puede afectar la alta polución en la salud de la población. Otro proyecto que beneficiaría a la ciudad de Quito particularmente, es la aplicación de esta tecnología para realizar estudios del tráfico de vehículos con el fin de proponer alternativas para disminuir la congestión vehicular, principalmente en las horas pico.

## REFERENCIAS

- [1] <http://mathworld.wolfram.com/SchlaefliSymbol.html>,

”Schläfli Symbol”.

- [2] <http://www.ifn.et.tu-dresden.de/marandin/ZigBee/ZigBeeSimulationEnvironment.html>, "Simulation of ZigBee".
- [3] XMesh MoteView User Manual, (2010), (Rev A), California: MEMSIC.
- [4] XMesh User Manual, (2010), (Rev A), California: MEMSIC.
- [5] XMesh User Manual, (2010), (Rev A), Pag.39. California: MEMSIC.
- [6] PISTER, Kris, "Instrumenting the Planet for Intelligence From Blue Sky to Business Impact".
- [7] H. Kopka and P. W. Daly, *A Guide*, 3rd ed. Harlow, England: Addison-Wesley, 1999.