

Modelo Óptimo de una Red de Sensores Inalámbrica para Monitorización Volcánica en Tiempo Real

Liliana Valencia, Román Lara-Cueva, Rodolfo Gordillo
 DEEE, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE
 Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones
 Quito - Sangolquí

Resumen—El mal despliegue de una red de sensores inalámbricos puede llegar a resultar dramático tanto para el rendimiento como para la viabilidad del mismo, sobre todo considerando que en una aplicación volcánica sus consecuencias podrían llegar a ser catastróficas tanto en las vidas humanas perdidas como en factores económicos, por esta razón es fundamental llegar a conocer el comportamiento de toda la red antes de implementarla en un entorno real, debido a que las redes de sensores inalámbricas presentan características especiales dentro de la comunicación o el mecanismo de transmisión de datos, es ahí donde es fundamental modelarla de manera que el análisis de su comportamiento vaya más allá de una simulación tradicional. En base a ello, en este artículo se han planteado distintos modelamientos para una red de sensores con comunicación inalámbrica *ZigBee* y un mecanismo *CSMA*, modelos que han sido determinados para distintos escenarios de despliegue en los cuales se han variado tanto el tiempo de muestreo como el número de nodos desplegados, los cuales han sido validados con resultados de despliegues reales implementados, de lo cual se obtuvo resultados satisfactorios, donde se pudo determinar que tanto el parámetro del exponente de *Backoff* como el parámetro de número de *slots*, métricas propias de *CSMA*, afectaban directamente al desempeño de la red medida a través del *Throughput*.

Index Terms—Modelo, *ZigBee*, *Throughput*, *delay*, Monitorización Volcánica, Nodos Sensores.

I. INTRODUCCIÓN

Los desastres naturales a través de los años han cobrado la vida de miles de personas debido a su comportamiento fortuito e impredecible [1], por esta razón cada gobierno ha optado por buscar alternativas que permitan salvaguardar la mayor cantidad de vidas y sobre todo que permita que la sociedad se encuentre informada de algún suceso, como es el caso de [2], en el cual se recalca la importancia de uso de las tecnologías de comunicación e información. Dentro del Ecuador debido a que nos encontramos rodeados de elevaciones potencialmente activas, el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional IGEPN se encuentra constantemente monitorizando a

los volcanes de mayor riesgo e incluso ha realizado estudios del comportamiento de alguno de ellos, como en [3]. Para ello el instituto hace uso de tecnología de punta como sismógrafos, sensores acústicos, sensores de emisiones difusas entre otros, con la desventaja que estos equipos son altos en costos, por lo que la adquisición de ellos es en baja cantidades, provocando así que la monitorización volcánica dentro de nuestro país sea insuficiente, es en este punto donde las redes de sensores inalámbricos cobran importancia [4] debido a su bajo costo de adquisición, además de poder trabajar en tiempo real, el despliegue de estos dispositivos cuenta con adaptabilidad a cualquier entorno, y una organización propia que permite dinamismo en la red, siendo esta una ventaja considerando el entorno hostil que se tiene en una elevación volcánica [5] [6].

Pero para poder llegar a garantizar el comportamiento correcto de estas redes de sensores es necesario realizar un modelamiento previo que nos permita determinar el comportamiento de distintos parámetros como el *throughput*, *delay*, consumo de energía y seguridad, los cuales nos ayudaran al análisis del desempeño de la red, como en [7], [8] y [9] donde a través de métodos marcovianos y haciendo uso de probabilidades lograron determinar el comportamiento del *Throughput* de una red de sensores inalámbricos con comunicación *ZigBee*, incluso se han realizado estudios del consumo de energía de sensores inalámbricos, como en [10] donde utilizando redes de Petri ha logrado determinar el tiempo de vida de la red.

En definitiva, este proyecto ha buscado incorporar el método analítico, es decir un modelamiento teórico del desempeño de la red con el método práctico basado en despliegues de redes de sensores inalámbricos basada en el estándar *IEEE 802.15.4* [11], buscando obtener una validación de un modelo matemático frente a resultados reales.

En base a ello este artículo se encuentra organizado de la siguiente manera, la sección II, contará con un breve explicación de las configuraciones aplicadas a los dis-

positivos y software utilizados para el despliegue. En la sección III, se explicarán los parámetros utilizados en el modelamiento, junto con la obtención de las curvas. En la sección IV se realizará la validación del modelo matemático referente a los resultados de despliegue obtenidos. Finalmente en la sección V se detallaran las conclusiones más relevantes de este proyecto junto con los trabajos futuros.

II. ESCENARIO DE DESPLIEGUE

En esta sección se detallan los requerimientos necesarios para una aplicación volcánica en tiempo real, además se explican los materiales y métodos utilizados para los despliegues realizados en este trabajo. Para el caso de una monitorización volcánica se debe tomar en cuenta que las señales sísmicas trabajan en el orden de 1 a 10 Hz [12], dando como resultado, que al aplicar la condición de Nyquist (Ecuación 1), la frecuencia de muestreo debe ser mayor a 20 Hz. Para esta aplicación se escogieron las frecuencias de 50 y 100 Hz, valores que cumplen con la condición mencionada, debido a que los sismógrafos utilizados en monitorización volcánica trabajan con estos valores de frecuencia.

$$W_s > 2W_c \quad (1)$$

Donde,

W_s : Representa la frecuencia de muestreo.

W_m : Representa la frecuencia contenida de la señal.

Otro de los requerimientos necesarios para una aplicación volcánica es el rango de pérdida de paquetes, en este trabajo se ha considerado un porcentaje máximo del 20%, este valor fue obtenido en base a la expresión 2. El tiempo total de transmisión de paquetes, a manera de ejemplo fue de 300 s es decir los 5 minutos aplicados al caso de interiores, cabe recalcar que el tiempo de transmisión total no influye directamente a los resultados de tendencia requeridos. Por otra parte el tiempo de muestreo aplicado fue de 20 ms, considerando que su frecuencia de muestreo de 50 Hz es la más cercana al límite referente a la condición de Nyquist. Una vez determinados los parámetros a utilizar en la expresión 2, se obtiene un total de 15000 paquetes enviados, de los cuales existirá un porcentaje de pérdida, provocado por un tiempo mayor de muestreo aproximado, el mismo que será calculado con la misma expresión 2, donde la tiempo de muestreo será representado con el inverso de la frecuencia de muestreo.

$$P_E = \frac{T_{Tx}}{T_s} \quad (2)$$

Donde,

P_E : Representa a los paquetes enviados en condiciones óptimas.

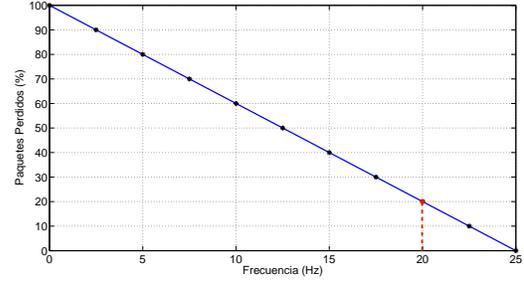


Figura 1. Relación Paquetes Perdidos respecto a la Frecuencia de Muestreo.

T_{Tx} : Representa el tiempo total de transmisión de paquetes.

T_s : Representa el Tiempo de muestreo aplicado.

Por otra parte, en un despliegue real es esencial considerar que su tiempo de muestreo tiende a ser el doble de su valor, por lo cual su frecuencia de muestreo será la mitad a la aplicada, dando así una relación de la frecuencia de muestreo respecto a los paquetes perdidos, como se observa en la figura 1. Donde se observa que a los 20 Hz, la pérdida de paquetes es del 20%, es decir tal porcentaje será el máximo requerido en una aplicación volcánica. Entre los requerimientos generales de este trabajo, fue necesario buscar equipos que permitieron la escalabilidad en un futuro de la red que se implementó en cada uno de los despliegues.

II-A. Materiales para el Despliegue

En el mercado existen infinidad de proveedoras de sensores inalámbricos como *Memsic*, *Smamid*, *Monnit* entre otros, en el presente trabajo fueron seleccionados los sensores *waspmote* de *Libelium* debido a que sus características como por ejemplo el envío de datos en milisegundos fueron acordes a los requerimientos de una monitorización volcánica en tiempo real, considerando sus bajas frecuencias de muestreo, además estos sensores permitían hacer uso de módulos como acelerómetros y sensores de gases.

Para la comunicación inalámbrica en los despliegues se utilizó la tecnología *ZigBee*, por esta razón se escogieron a los módulos *XBEE PRO S2* de *Digi-International* los cuales contaban con la posibilidad que un nodo pudiera trabajar tanto como *Router* o como *End-Device*, lo cual nos garantizaba que la red podía ser escalable posteriormente, además estos dispositivos contaban con una rango de alcance superior a otros dispositivos del mercado.

En cuanto a las herramientas de *software* utilizadas para la adquisición de datos se utilizó *Matlab R2013b* para el desarrollo de un programa que pudiera obtener tanto los datos de paquetes perdidos como de acelerómetro, debido a su procesamiento superior de datos. Por otro lado para la obtención del *delay* real de la

Cuadro I
PARÁMETROS IGUALES CONFIGURADOS EN LOS MÓDULOS
XBEE PRO SERIES 2.

Nodo	PAN ID	Scan Channels	Baud Rate	Canal de Operación
Coordinador	123	1FFE	38400	14
Router/End device	123	1FFE	38400	14

red desplegada se hizo uso del *softwareData Logger Suite* un *sniffer* de puertos COM, el mismo que fue escogido por permitir almacenar en archivos de texto, los datos recibidos a través del puerto junto con marcas de tiempo en el orden de los milisegundos, un punto indispensable frente al envío de datos que se iba a realizar en cada despliegue.

II-B. Metodología Aplicada

II-B1. Wasmote de Libelium: Para la programación de los sensores *wasmote* se utilizó el programa *Wasmote IDE*, en donde basados en un ejemplo brindado por Libelium "*Wasmote XBEE XSC Sending & Receiving Example*", en el cual nos permitía activar el envío de los datos haciendo uso del módulo *XBEE*. Este ejemplo fue modificado con la finalidad de activar adicionalmente el módulo del acelerómetro. El dato enviado a través de la comunicación inalámbrica incluyó a los ejes de movimiento del acelerómetro, un contador de tramas y un identificador ubicado al inicio de cada dato, el mismo que era distinto para cada uno de los sensores desplegados, como se ve en la expresión mostrada.

```
sprintf(aux, "Ax%dy%dz%d,F%d.", ACC.getX(),
ACC.getY(), ACC.getZ(), contfram, '%', '\r');
```

Como se había mencionado, estos sensores fueron seleccionados principalmente debido a su capacidad de trabajo en el orden de los milisegundos, este parámetro fue especificado a través de la sentencia *delay* dentro del programa de cada sensor *wasmote*, lo que determinaba el tiempo de muestreo de cada transmisión de paquetes. En el presente trabajo se utilizaron dos tiempos de muestreo 10 y 20 ms acordes a las frecuencias de muestreo de 50 y 100 Hz, mencionadas en los requerimientos del presente proyecto.

II-B2. Módulos XBEE PRO S2: En cuanto a la configuración de los módulos para la comunicación inalámbrica *ZigBee*, fue necesario configurar su *firmware* a través del *software* propio de *Digi-International, X-CTU*. En este caso se trabajó con el *firmware XBP24-B - ZNET 2.5* en modo AT, considerando que este nos permitía utilizar a cada nodo como *Router* o como dispositivo *End-Device* simultáneamente, en la tabla I y II se muestran los parámetros de configuración aplicados a cada uno de los nodos, con la finalidad que su comunicación sea exitosa.

Cuadro II
PARÁMETROS DE DIRECCIÓN EN LOS MÓDULOS XBEE PRO
SERIES 2.

Dirección Destino	Dirección Serial
Broadcast	13A200 4090C508
13A200 4090C508	C/Módulo.

II-B3. Programa Desarrollado en Matlab R2013b: Para la adquisición de datos tanto de acelerómetro como de paquetes se desarrolló un programa el mismo que contaba con las siguientes etapas.

- Lectura del puerto COM.
- Almacenamiento de los valores recolectados de todos los sensores.
- Clasificación y almacenamiento de los datos recolectados por cada Sensor.
- Almacenamiento de datos en archivos .csv.

II-B4. Data Logger Suite - DLS: Esta herramienta de *software* fue utilizada en modo espía paralelamente con la ejecución del programa desarrollado en *Matlab*, fue aplicada solamente en dos rangos pequeños de tiempo dentro de cada despliegue debido a las limitantes de la versión libre de este *software*.

II-C. Consideraciones de Despliegue

Fueron realizadas tres pruebas de despliegue una en interiores y dos en exteriores dentro de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. La prueba de interiores fue desarrollada en siete escenarios variando los nodos de 2 a 8, y con un tiempo de muestreo de 20 ms, cada escenario realizó su transmisión de datos en un lapso de tiempo de 5 minutos. En exteriores se implementaron 14 escenarios 7 con un tiempo de muestreo de 10 ms y 7 con un tiempo de muestreo de 20 ms, estas dos pruebas se realizaron en igualdad de condiciones es decir con un mismo entorno y puntos de despliegue. Cada escenario en exteriores se desplegó por un rango de tiempo de 10 minutos.

En las figuras 2 y 3 se observa la topología aplicada tanto en interiores como en exteriores respectivamente, esta topología fue seleccionada debido a que se debía definir un número de nodos óptimos aplicados a un nodo *Router*, considerando que este trabaja en topología estrella, con la finalidad de en un futuro poder llegar a aplicar topologías más complejas y con un mayor número de nodos. Por otra parte en el caso de exteriores las distancias de cada nodo con respecto al gateway fueron menores a 70 m, como se muestra en la cuadro III. En cada escenario desplegado se ejecutó el programa desarrollado en *Matlab* paralelamente al *software Data Logger Suite*, los cuales brindaron los datos de acelerómetro, paquetes perdidos y *delay* para su posterior análisis, los resultados obtenidos fueron tabulados respecto al número de nodos desplegados.

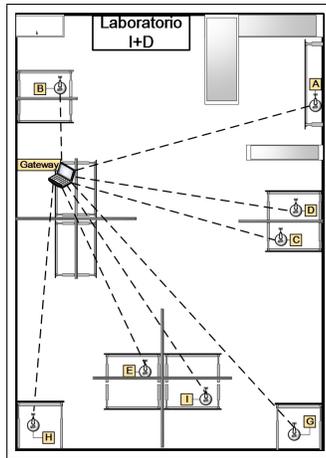


Figura 2. Escenario de Ocho Nodos Desplegado en Interiores.

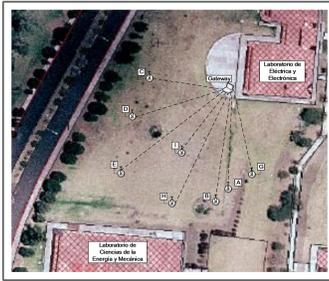


Figura 3. Escenario de Ocho Nodos Desplegado en Exteriores.

III. PLANTEAMIENTO DEL MODELO

En esta sección se detalla la obtención del modelo genérico de *Throughput* Normalizado, uno de los parámetros que determina el desempeño de una red, en base a la técnica de modelamiento seleccionada, la misma que también es brevemente explicada. Por último se presenta los modelos obtenidos respecto a las consideraciones aplicadas referentes a monitorización volcánica.

Las técnicas de modelamiento mejor acopladas a una aplicación volcánica con transmisión *ZigBee* son las basadas en álgebra de procesos, debido a que estas nos permiten trabajar con probabilidades, entre ellas cadenas de Markov, con las cuales se puede llegar a considerar el estado del canal y la transmisión de datos. A pesar que estas técnicas no trabajan con un software específico de modelamiento, sus expresiones son definidas a través de ecuaciones matemáticas.

Los parámetros parte del modelamiento fueron en este trabajo determinados respecto al mecanismo *CSMA*, el cual a través de un periodo de contención permite que todos los nodos que desean transmitir sus paquetes compitan por hacer uso del canal, utilizando una ventana de contención aleatoria, que evita que exista colisiones o errores en el canal. *CSMA* usa el algoritmo detallado en la figura 4, el mismo que a permitido definir como parámetros esenciales a *NB*, *CCA*, *W* y

Cuadro III
DISTANCIA DE NODOS AL *gateway* EN PRUEBA EN EXTERIORES.

Nodo	Distancia al <i>gateway</i>
G	32,55764
A	35,73514
I	41,72529
B	42,75512
C	47,07441
D	49,36598
E	61,22091
H	63,41136

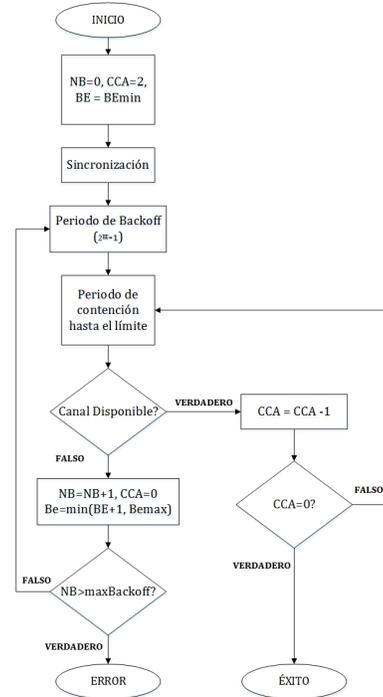


Figura 4. Algoritmo aplicado en CSMA.

BE.

- **NB:** *Number of Backoffs* indica el número de veces que cada nodo intentará transmitir su información, su valor siempre debe ser inicializado en 0.
- **CCA:** *Clear Channel Assessment* indica el número de evaluaciones del canal a realizar para poder transmitir la información de un nodo. Se inicializa generalmente en dos.
- **BE:** *Backoff Exponent* determina cuantos periodos de *Backoff* un dispositivo tiene que esperar antes de intentar el acceso al canal.
- **W:** *Contention Window Length* define el número de periodos de *Backoff* que se requiere para poder conocer la actividad del canal antes de iniciar una transmisión, el cual viene expresado por la siguiente ecuación:

$$W = 2^{Bemin} \quad (3)$$

Por otra parte se conoce que el contador de

Backoff puede ir entre 0 y $W - 1$, lo que nos da como resultado que el periodo de *Backoff* promedio obtenido es:

$$W_{Backoff} = \frac{W}{2} \quad (4)$$

Cabe recalcar que este resultado es considerado para condiciones iniciales es decir en un estado $i = 0$, donde se realiza el primer sensamiento en el canal.

III-A. Obtención de Modelo Matemático

En cuanto a las variables de salida, se determinó que el *Throughput* normalizado es uno de los parámetros que define claramente el desempeño de la red de sensores inalámbricos con transmisión *ZigBee* y mecanismo de acceso al canal *CSMA*. Para la obtención de su modelamiento se optó por utilizar un modelo ejemplo obtenido de la investigación "*QoS Performance Analysis of IEEE 802.15.4 MAC in LR-WPAN with Bursty Error Channels*" ([8]), el modelo se encuentra basado en técnicas marcovianas, es decir trabaja con los métodos basados en álgebra de procesos, donde a través de la expresión 5 se define el comportamiento modelado del *Throughput*.

$$Th = L \cdot P_{Succ} \quad (5)$$

Donde,

Th : *Throughput* Modelado.

L : Número de *slots* que se utiliza en cada transmisión.

P_{Succ} : Probabilidad de transmitir una trama en un *slot* exitosamente, se encuentra representado con la ecuación 6.

$$P_{Succ} = 1 - P_c + [1 - P_c]P_e \quad (6)$$

P_c Probabilidad de colisión representada por la expresión 7.

$$P_c = 1 - n \cdot \tau' \cdot (1 - \tau')^{n-1} \cdot (1 - p_1)(1 - p_2) \quad (7)$$

Donde,

n : Número de nodos que trabajan en la red, aparte del coordinador.

p_1 : Probabilidad que el canal sensado este ocupado en CCA_1 .

p_2 : Probabilidad que el canal sensado este ocupado en CCA_2 .

τ' : Probabilidad que el nodo detecte un canal, representado por la ecuación 8.

$$\tau' = \frac{1 - P_0}{W_{Backoff}} \quad (8)$$

Donde,

P_0 : Probabilidad que la cola de transmisión se encuentre vacía.

Cuadro IV

Delay PROMEDIO OBTENIDO EN CADA PRUEBA REALIZADA.

Despliegue	Delay Promedio (ms)
Interiores [20 ms]	80,6
Exteriores [10 ms]	68,2
Exteriores [20 ms]	61,2

$W_{Backoff}$: Periodo de *Backoff* Promedio, representado por la expresión 9.

$$W_{Backoff} = 2^i \cdot W / 2, i \in (0 : m), m = BE_{max} - BE_{min} \quad (9)$$

Y el tamaño de la ventana de contención W , representado por la ecuación 3. Por otra parte, la probabilidad de falla en el canal P_e utilizada en la ecuación 6, se encuentra representada por la expresión 10.

$$P_e = 1 - \pi_g \cdot e^{V_g \cdot L} \quad (10)$$

Donde,

V_g : Tiempo probable de transición de Estado Bueno a Malo.

π_g : Probabilidad que la transmisión se encuentre en buen estado. Su valor se obtiene a través de la ecuación 11, en donde se relacionan sus periodos de transición.

$$\pi_g = \frac{V_g}{V_g + V_b} \quad (11)$$

V_b representa el tiempo probable de transición de estado malo a bueno. Se considera a un canal en estado bueno, cuando este se encuentra libre de errores y si la transmisión de trama falla este estado es considerado malo.

Por lo tanto, en base a las ecuaciones 5, 6, 7 y 10 se determinó el modelo genérico del *Throughput* en función del número de nodos (Ecuación 12), considerando que los resultados obtenidos en el despliegue se encuentran representados de esta manera.

$$Th = L \cdot n \cdot \tau' \cdot (1 - \tau')^{n-1} \cdot (1 - p_1)(1 - p_2) \cdot \pi_g \cdot e^{V_g \cdot L} \quad (12)$$

En base a este modelo genérico, se aplicó algunas consideraciones propias de este proyecto, como por ejemplo la expresión 13, donde se define una ecuación para p_1 y p_2 respecto a condiciones iniciales del canal.

$$p_1 = p_2 = \frac{1}{n+1} \quad (13)$$

En cuanto al tiempo de transición de un estado bueno del canal a un estado malo y viceversa, fue considerado el *delay* aproximado obtenido en cada uno de los despliegues realizados, valores presentados en la tabla IV. En base a las aseveraciones realizadas, se obtuvo la expresión 14, modelo matemático determinado según los requerimientos planteados de este trabajo, para cada una de las pruebas realizadas, donde d representa al *delay* promedio para cada escenario.

$$Th = L \cdot n \cdot \tau' \cdot (1 - \tau')^{n-1} \cdot \left(1 - \frac{1}{n+1}\right) \cdot \left(1 - \frac{1}{n+1}\right) \cdot (0,5) \cdot e^{d \cdot L} \quad (14)$$

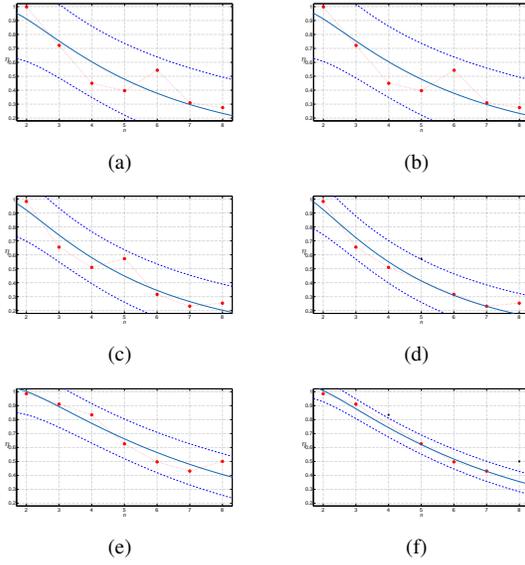


Figura 5. Interpolación realizada en Interiores 20ms: a-b; Exteriores 10ms: c-d; Exteriores 20ms: e-f; Despliegue: Línea Roja Punteada; Curva Interpolada: Línea Azul Continúa; Curvas de Confianza: Línea Azul Punteada

III-B. Curvas de Modelamiento

Con el objetivo de obtener un modelo óptimo para el despliegue realizado en este proyecto, fue necesario obtener valores aproximados tanto de BE_{min} , W y L . Para ello se realizaron interpolaciones de las curvas de despliegue respecto al modelo matemático obtenido para cada una de las pruebas realizadas tanto en interiores como exteriores, utilizando la herramienta de *Matlab*, *Curve Fitting*. Para los tres casos de despliegue, debido a ciertos escenarios que tenían valores que no se encontraban ajustados a la tendencia total de cada curva, como se observa en las figuras 5(a), 5(c) y 5(e), se optó por realizar otra interpolación exceptuando estos puntos como se ve en las figuras 5(b), 5(d) y 5(f), lo cual permitió corroborar los valores obtenidos en la primera interpolación. En base a los resultados de la interpolación junto con sus rangos de confianza, se logró determinar que los valores de BE_{min} se encontraba entre 3,4 y el número de *slots* variaba de 6 a 10 *slots*.

Una vez determinados estos valores en las figuras 6(a), 6(c), 6(e) se muestran las curvas de modelamiento obtenidas para cada caso respectivamente, con BE_{min} de 3, con variación del número de *slots* de 6 a 10, en donde se puede observar que al llegar a los 20 nodos aproximadamente su *Throughput* es prácticamente nulo, es decir se tiene una pérdida de paquetes total. En cambio según las curvas de modelamiento obtenidas en las figuras 6(b), 6(d), 6(f) para un BE_{min} de 4, al llegar a los 35 nodos su *Throughput* comienza a aproximarse a un valor nulo, el número de nodos es mayor considerando que al tener una ventana de

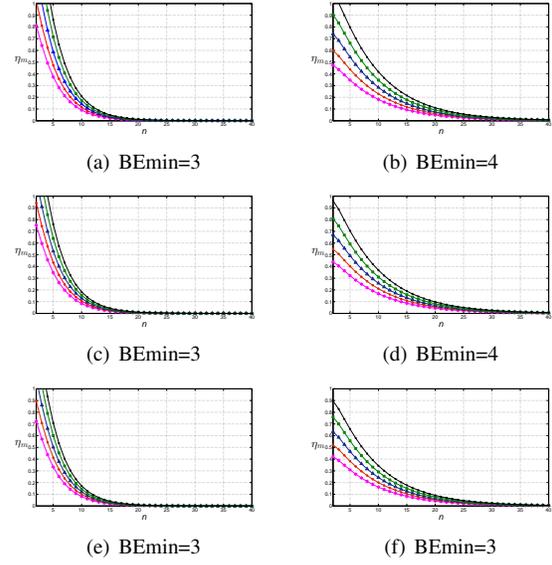


Figura 6. Curvas de Modelamiento Interiores 20ms: a-b; Exteriores 10ms: c-d; Exteriores 20ms: e-f; Curva L=6: Línea Rosada; Curva L=7: Línea Roja; Curva L=8: Línea Azul; Curva L=9: Línea Verde; Curva L=10: Línea Negra

contención mayor el número de colisiones disminuirá provocando una pérdida de paquetes menor en cada escenario.

IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se analizan los resultados obtenidos de paquetes perdidos, *delay* para cada escenario, además se detalla la obtención del *Throughput* calculado y finalmente se validan los modelamientos obtenidos para cada prueba de despliegue.

Al realizar un despliegue de sensores inalámbricos tanto en interiores como en exteriores, es importante aplicar una comparación del desempeño para cada escenario planteado, con el fin de poder obtener conclusiones válidas con respecto a las configuraciones de los dispositivos, topologías, y parámetros configurados para el despliegue.

Respecto a los paquetes perdidos, como se observa en la figura 7(a), se pudo determinar que en el caso de interiores debido a factores externos como por ejemplo el multitrayecto, su pérdida de paquetes fue en mayor grado, dando como resultado que solamente el escenario de 2 nodos podía ser aplicado a monitorización volcánica, debido a que su pérdida de paquetes fue menor al 20%, parámetro limitante dado para una monitorización volcánica, de la misma forma que sucedió en el caso de exteriores con un tiempo de muestreo de 10 ms (Figura 7(b)), donde solamente se podía aplicar el escenario de 2 nodos. A diferencia de la prueba de exteriores con un tiempo de muestreo de 20 ms, la misma que aparte de mostrar menores pérdidas de paquetes en todos los escenarios, esta

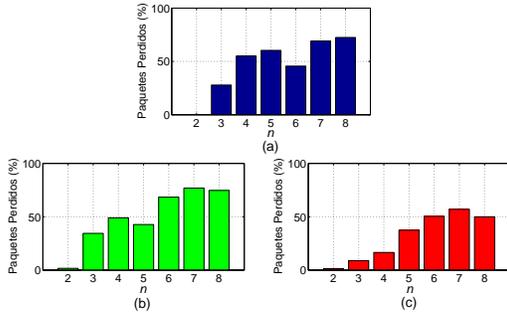


Figura 7. Paquetes Perdidos con respecto al Número de Nodos ; Interiores 20ms: Barras Azules ; Exteriores 10ms: Barras Verdes ; Exteriores 20ms: Barras Rojas.

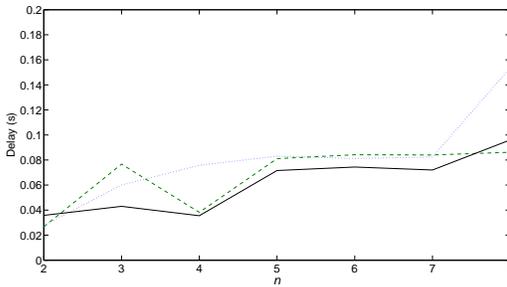


Figura 8. Delay Real (DLS) respecto al número de Nodos; Interiores 20ms: Línea Azul Punteada ; Exteriores 10ms: Línea Verde Entrecortada ; Exteriores 20ms: Línea Contínua.

prueba podía utilizar hasta 4 nodos sin llegar a superar el 20% de paquetes perdidos como se ve en la figura 7(c), con ello logrando definir que un nodo *Router* dentro de una topología *Mesh* solamente podría estar comunicado con 4 nodos. En cuanto al *delay* real obtenido a través del *software Data Logger Suite - DLS*, la figura 8 muestra claramente que el mayor *delay* obtenido fue en el caso de interiores con un tiempo de muestreo de 20 ms, un comportamiento bastante lógico considerando que la pérdida de paquetes también fue mayor, en el caso de exteriores con un tiempo de muestreo de 20 ms, se observa una tendencia en donde aproximadamente cada cuatro nodos, el *delay* tiende a subir un valor cercano a 25 ms, pudiendo determinar así el posible comportamiento de los módulos *XBEE* al ir aumentando los nodos desplegados. Se puede recalcar a demás que en el caso de exteriores con 10 ms, exceptuando al escenario con tres nodos, también cuenta con la tendencia de aumentar 25 ms cada cuatro nodos, aunque no se encuentra muy bien definida, al igual que en el caso de interiores con tiempo de muestreo de 20 ms.

Para poder calcular el *Throughput* se utilizó la expresión 15, la misma que nos permite obtener los valores normalizados referentes al número de paquetes recibidos y enviados, la figura 9 muestra los resultados obtenidos para cada uno de los escenarios, donde se

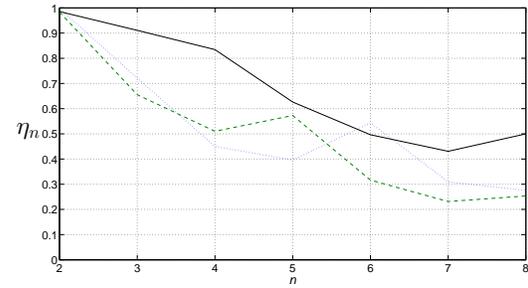


Figura 9. Throughput Normalizado respecto al Número de Nodos ; Interiores 20ms: Línea Azul Punteada ; Exteriores 10ms: Línea Verde Entrecortada ; Exteriores 20ms: Línea Contínua.

puede recalcar, que de igual manera el escenario con un tiempo de muestreo de 20 ms es el que cuenta con un mejor desempeño en la red, debido a su menor pérdida de paquetes en comparación a los otros dos casos, además cabe recalcar que la tendencia en todas las pruebas define un comportamiento en donde a mayor número de nodos su *Throughput* es menor.

$$\eta_N(\%) = \frac{PR}{PE} * 100 \quad (15)$$

Donde,

$\eta_N(\%)$: Representa al *Throughput* Normalizado en porcentaje.

PR : Representa a los paquetes Recibidos.

PE : Representa a los paquetes Enviados.

Algo importante a considerar es que se utilizó el *Throughput* normalizado considerando que este nos permite trabajar con parámetros como el número de *slots*, métrica utilizada en el modelamiento, a diferencia del *Throughput* normal el cual involucra tasas de transmisión y tamaño de mensajes.

IV-A. Validación del Modelamiento

Para llegar a validar el modelamiento obtenido es necesario comparar los resultados dados en los despliegues a nivel de campo, con los resultados generados por cada uno de sus modelos.

En el caso de interiores, según las figuras 10(a) y 10(b), se observa que solamente en el caso aplicado con un *BEmin* de 3 y 7 *slots* por cada transmisión, su curva se ajusta al modelamiento a diferencia de las otras curvas modeladas con un *BEmin* de 4. Además cabe recalcar que según la figura 10(b) el modelo solamente admite dos o tres nodos en un despliegue, respecto a la consideración de 0,8 *Throughput* requerida en monitorización volcánica en base a la máxima pérdida de paquetes del 20%. Este valor de número de nodos también fue obtenido en los resultados del despliegue real en interiores.

Respecto al caso de exteriores con un tiempo de muestreo de 10 ms, en las figuras 10(c) y 10(d) se

Cuadro V
PARÁMETROS DEL MODELAMIENTO PARA CADA DESPLIEGUE
IMPLEMENTADO.

	BE_{min}	L
Interiores [20 ms]	3	7
Exteriores [10 ms]	3	7
Exteriores [20 ms]	4	10

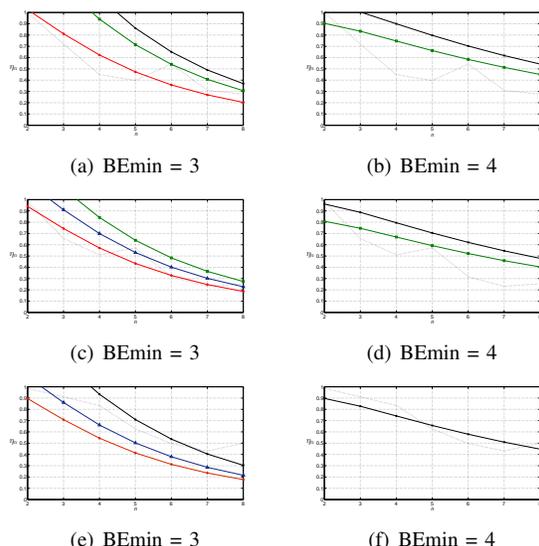


Figura 10. Curvas de Modelamiento con Despliegue, Interiores 20ms: a-b; Exteriores 10ms: c-d; Exteriores 20ms: e-f; Despliegue: Línea Negra Punteada; Curva L=7: Línea Roja Continúa; Curva L=8: Línea Azul Continúa; Curva L=9: Línea Verde Continúa; Curva L=10: Línea Negra Continúa.

observa que el despliegue se ajusta a la curva modelada con un BE_{min} de 3 y de igual manera con 7 slots, para las demás curvas modeladas el despliegue se encuentra bastante lejano, incluso para el caso aplicado con un BE_{min} de 4. De igual manera en esta prueba se corroboraron tanto en el modelo como en el despliegue real el uso de dos nodos solamente para que cumpla con la especificación definida para monitorización volcánica. Finalmente para el caso de exteriores con un tiempo de muestreo de 20 ms, a diferencia de los dos casos anteriores, se observa en las figuras 10(e) y 10(f) que la curva de despliegue se ajustó al modelo dado con un BE_{min} de 4 con 10 slots para cada transmisión. En este caso, el modelo muestra un número máximo de nodos a desplegarse de tres, pero en la despliegue se obtuvo un valor máximo de 4 nodos, tomando en cuenta que en el escenario con 4 nodos su valor de pérdida de paquetes fue del 16,6%, valor bastante próximo al límite del 20%, por lo que se puede decir que su modelo solamente tomó los escenarios con resultados de *Throughput* que son mayores significativamente a su límite de 0,8.

IV-A1. Parámetros Resultantes del Modelamiento: Una vez determinados los modelos que se ajustaron a cada uno de los casos, se pudo decir que los resultados

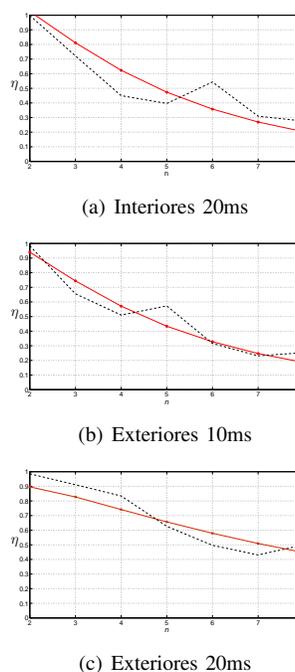


Figura 11. Curvas de Modelamiento Ajustadas a Despliegue; Curva de Despliegue: Línea Negra Punteada; Curva de Modelamiento: Línea Roja Continúa.

obtenidos han sido válidos para los despliegues realizados en este trabajo (Figura 11(a), 11(b), 11(c)). La tabla V muestra un resumen de los parámetros a los cuales fueron ajustados cada uno de los despliegues, donde se puede recalcar que en el caso de exteriores con un tiempo de muestreo de 20 ms el cual tuvo un mejor desempeño entre las tres pruebas realizadas, obtuvo valores tanto en su ventana de contención como de número de slots mayores a los otros dos casos, con lo que se puede determinar que al ir aumentando el valor de estos parámetros, el desempeño de la red mejorará, definiendo así como los parámetros de un mecanismo CSMA aplicado a una comunicación ZigBee llegan a afectar el mismo.

V. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos en el despliegue para el caso de interiores con un tiempo de muestreo de 20 ms, se pudo concluir que los efectos de la propagación de las señales, producidos por ciertos fenómenos como el multirayecto, llegaban a afectar a la transmisión de datos en cada nodo, provocando pérdidas de paquetes y *delay*.

Una vez realizadas las pruebas en un ambiente controlado en exteriores, con los dos tiempos de muestreo aplicados para una monitorización volcánica, 10 y 20 ms, se determinó en base a los resultados obtenidos que el mejor desempeño tanto de paquetes recibidos como de *delay* se daba aplicando un tiempo de muestreo de 20 ms, esto se justifica considerando que en este caso

la velocidad de transmisión es menor a la empleada en un tiempo de muestreo de 10 ms, lo que provoca que las colisiones de paquetes enviados por cada nodo sean menores, con ello se reduce la pérdida de paquetes, logrando así que el *delay* promedio de la transmisión no aumente.

Con respecto a los resultados obtenidos de *delay* en cada uno de los casos desplegados en este proyecto, se pudo determinar un comportamiento en común de los nodos sensores utilizados en la red, en donde incrementaba 25 ms por cada cuatro nodos que se aumentara a la misma, independientemente del tiempo de muestreo que se aplicara al despliegue.

Una vez realizada la validación del modelamiento con el despliegue de la red de sensores inalámbrica, se llegó a la conclusión que el número de *slots* utilizados en la transmisión y el tamaño de la ventana de contención son factores indispensables que definen el comportamiento de una red, considerando que a mayor número de *slots* utilizados en la transmisión de datos, con un límite de 10 debido a las características propias de la tecnología *ZigBee*, menores serán sus pérdidas de paquetes, por otro lado al aumentar el tamaño de la ventana de contención, esta permitirá reducir las colisiones en la red, logrando con ello una mejora tanto en paquetes recibidos como en los valores de *delay*.

En el presente trabajo, se realizó un despliegue con topología tipo estrella, en el cual se determinó el número óptimo de nodos por cada *Router* en base a los resultados obtenidos en la prueba de exteriores con un tiempo de muestreo de 20 ms, por ello se recomienda realizar como un trabajo continuo, el despliegue de los sensores *Wasmote* con una topología tipo *Mesh*, en la cual ya se deberán involucrar técnicas de enrutamiento en los nodos *Router* desplegados, con la finalidad de obtener resultados de desempeño de la red.

Considerando que el consumo de energía es una de las métricas fundamentales para garantizar el correcto desempeño de una red, se recomienda realizar en un futuro, investigaciones relacionadas al modelamiento del comportamiento de este parámetro en los sensores *Wasmote*, aplicando diversas técnicas como por ejemplo las redes de Petri, las mismas que utilizan las autómatas celulares, incluso en base al modelamiento planteado se podría llegar a optimizar el tiempo de vida en las baterías de cada nodo.

REFERENCIAS

- [1] *Impacto de los Desastres en la Salud Pública*, 2002.
- [2] P. Carracedo, "Las tic en la prevención de desastres naturales," *II Congreso de Computación para el Desarrollo. Departamento de Automática, Universidad de Alcalá de Henares*, 2009.
- [3] C. L. D. Bedon, "Sistema de apoyo a la vigilancia sísmica y volcánica para el instituto geofísico de la escuela politécnica nacional," Master's thesis, Escuela Politécnica Nacional, 2007.
- [4] C. Chong and P. Kumar, "Sensor networks: Evolution, opportunities, and challenges," *IEEE, VOL. 91, NO. 8*, 2003.

- [5] W. Geoffrey, J. Johnson, M. Ruiz, J. Lees, and M. Welsh, "Monitoring volcanic eruptions with a wireless sensor network," *Harvard University*, 2004.
- [6] R. Lara, P. Vizcaino, and J. Alvarez, "Caracterización de un sistema de monitoreo del volcán cotopaxi empleando sensores inalámbricos," *LatimCom 2009*, 2009.
- [7] J. Gao, J. Hu, and G. Min, "Performance modelling of ieeec 802.15.4 mac in lr-wpan with bursty on-off traffic," *IEEE Ninth International Conference on Computer and Information Technology*, 2009.
- [8] J. Gao, J. Hu, G. Min, and L. Xu, "Qos performance analysis of ieeec 802.15.4 mac in lr-wpan with bursty error channels," *IEEE Fifth International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks*, 2009.
- [9] A. Koubaa, M. Alves, and E. Tovar, "Modeling and worst-case dimensioning of cluster-tree wireless sensor networks," *Real-Time Systems Symposium, 2006. RTSS '06. 27th IEEE International*, 2006.
- [10] P. Godoy, L. Iacono, and R. Cayssials, "Simulación de redes de sensores mediante autómatas celulares," *XVIII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*, 2010.
- [11] IEEE-Society, "Ieeec standard for local and metropolitan area networks," IEEE-Society, Tech. Rep., 2011.
- [12] M. Correas, "Origen, clasificación y análisis de las señales sismo-volcánicas," *Observatorio-Moquegua, Tech. Rep.*, 2011.