

Protocolo de Encaminamiento Multicamino con QoS para Comunicaciones Industriales Inalámbricas

Miguel Sepulcre⁽¹⁾, Javier Gozalvez⁽¹⁾, Oscar López⁽²⁾, Mikel Uriarte⁽²⁾

msepulcre@umh.es, j.gozalvez@umh.es, olopez@nextel.es, muriarte@nextel.es

⁽¹⁾ Uwicore, Ubiquitous Wireless Communications Research Laboratory, www.uwicore.umh.es
Universidad Miguel Hernández de Elche. Avda. de la Universidad s/n, 03202, Elche, España.

⁽²⁾ NEXTEL, S.A. Parque Tecnológico, Edificio 207, 48170, Zamudio, España.

Abstract- Distributed and mobile sensing technologies can facilitate the deployment of novel industrial applications to improve a factory's productivity or the workers' health and safety conditions. However, the deployment of reliable wireless communication systems in industrial environments imposes significant challenges derived from the harsh propagation conditions, and the strict quality of service (QoS) requirements of industrial applications. In this context, this paper presents a multipath routing protocol that is able to establish the necessary redundant routes between any pair of nodes of a wireless network to provide the QoS levels demanded by the applications. To this aim, the proposed protocol is based on different QoS metrics that estimate the reliability and delay of a multipath route.

I. INTRODUCCIÓN

En el nuevo marco Europeo de Fábrica del Futuro (FoF, *Factory of the Future*), los trabajadores representan un activo importante para la mejora de la competitividad y productividad. Con el objetivo de mejorar la salud y seguridad del trabajador en su entorno de trabajo, el proyecto FASyS (Fábrica Absolutamente Segura y Saludable) [1] se centra en el desarrollo de un nuevo modelo de fábrica, tratando aspectos como la prevención, monitorización de salud personalizada, o técnicas de procesamiento de datos y toma de decisiones. Un componente tecnológico clave de FASyS es el despliegue de un sistema de comunicaciones inalámbricas heterogéneas *end-to-end* para la continua monitorización del entorno de trabajo y la salud y condiciones fisiológicas del trabajador. Una de las tecnologías que formarán parte de este sistema de comunicaciones debido a su flexibilidad, bajo coste y reducido consumo de energía son las redes de sensores inalámbricas (WSN, *Wireless Sensor Networks*) basadas en el estándar IEEE 802.15.4.

A pesar de su enorme potencial, las WSN no fueron originalmente diseñadas para soportar los estrictos niveles de calidad de servicio (QoS, *Quality of Service*) de las aplicaciones del entorno industrial, como las aplicaciones de monitorización y control, que demandan fundamentalmente fiabilidad y retardo. Por esta razón, se requiere proporcionar a las WSN de nuevos mecanismos y protocolos de comunicación que les permitan soportar adecuados niveles de QoS. En particular, se han propuesto mecanismos que operan en la capa MAC, como el implementado por el estándar de comunicaciones industriales inalámbricas WirelessHART,

que adopta el mecanismo de acceso al medio TDMA sobre IEEE 802.15.4, o en la capa de red, con protocolos de encaminamiento que establecen rutas teniendo en cuenta el nivel de QoS.

En la capa de red, destacan por un lado los protocolos que realizan el establecimiento de las rutas en base a la calidad de cada uno de los enlaces para la mejora de la fiabilidad extremo a extremo. Por ejemplo, el protocolo proactivo QOLSR (QoS *Optimized Link State Routing*) propuesto en [2], emplea el nivel de PDR (*Packet Delivery Ratio*) medido por la capa MAC para seleccionar los enlaces que formarán cada ruta. Por otro lado, destacan los protocolos centrados en obtener rutas con mínimo retardo. Un ejemplo de este tipo de protocolos es el protocolo reactivo DSARP (*Delay-Sensitive Adaptive Routing Protocol*) [3], en el que el descubrimiento de cada ruta tiene en cuenta el estado del buffer de transmisión de cada nodo, como medida de la carga que soporta cada nodo, para minimizar el retardo extremo a extremo. El protocolo AAQR (*Application Aware QoS Routing*) [4] mide el retardo entre dos nodos de forma estadística mediante el protocolo RTP (*Real-time Transport Protocol*) y lo compara con el retardo exigido por las aplicaciones para seleccionar la mejor ruta entre los nodos origen y destino. Con el principal objetivo de mejorar la fiabilidad y retardo de las comunicaciones, una parte de los protocolos de encaminamiento propuestos en la literatura consideran el empleo de múltiples rutas entre los nodos origen y destino. Esta consideración puede ser especialmente relevante cuando las condiciones del entorno impiden que se puedan cumplir los niveles de QoS con el empleo de una única ruta. Por ejemplo, diversos trabajos como [5] proponen el mantenimiento de rutas redundantes como rutas alternativas a emplear cuando la ruta principal falla, y con ello minimizar el retardo ante la caída de algún enlace de una ruta activa. Por otro lado, otros trabajos como [6] tratan de averiguar el óptimo número de rutas y la cantidad de información a transmitir por cada una de ellas para maximizar la fiabilidad extremo a extremo de forma analítica. Finalmente, otros trabajos relacionados tratan de minimizar el retardo entre origen y destino distribuyendo el tráfico entre múltiples rutas fijadas de antemano [7].

A pesar de los notables avances en este campo, la mayor parte de los protocolos de encaminamiento diseñados no basan su funcionamiento en el cumplimiento de los requisitos de QoS marcados por ciertas aplicaciones. Este aspecto es especialmente necesario cuando incluso la ruta óptima no es

capaz de cumplir dichos requisitos, para lo cual se requiere el empleo de múltiples rutas redundantes. En este contexto, este trabajo propone un protocolo de encaminamiento multicamino que emplea múltiples rutas redundantes para alcanzar los requisitos de fiabilidad y retardo que imponen aplicaciones como las del entorno industrial. El protocolo propuesto emplea una serie de métricas de rendimiento diseñadas para ser capaces de estimar la fiabilidad y retardo de una o varias rutas redundantes de forma robusta.

II. MÉTRICAS PARA LA ESTIMACIÓN DE QOS EN REDES MULTICAMINO

Para el establecimiento de rutas que sean capaces de cumplir ciertos requisitos de fiabilidad y retardo, se requiere el diseño de métricas de rendimiento que permitan estimar de antemano dichos parámetros. Gran parte de las métricas existentes en la literatura se basan en el cálculo de valores medios. Dos ejemplos significativos son la métrica ETX (*Expected Transmission count*) [8], que se define como el número medio de transmisiones requeridas para entregar con éxito un paquete en un enlace, o la métrica ETT (*Expected Transmission Time*) [9], que es una extensión de la métrica ETX que además tiene en cuenta el tiempo esperado necesario para realizar una transmisión correcta. Las métricas existentes en la literatura que consideran múltiples rutas se centran fundamentalmente en medir el *throughput*. Un ejemplo de ello es la métrica LAETT (*Load Aware ETT*) [10] que tiene el doble objetivo de obtener rutas que cumplan un determinado ancho de banda, y dejar suficiente ancho de banda para futuras peticiones. En este contexto, aplicaciones con estrictos requisitos, como las consideradas en el entorno industrial, requieren mayores garantías que simplemente el cumplimiento de un valor medio. Por ello, y por la necesidad de aplicar este concepto al establecimiento de rutas con múltiples saltos y con múltiples rutas redundantes, se proponen las siguientes métricas para la estimación de la fiabilidad y retardo en redes inalámbricas ad-hoc.

A. Fiabilidad

La fiabilidad extremo a extremo en una comunicación puede estimarse a partir de la fiabilidad de cada uno de los enlaces que la forman, teniendo en cuenta el número de saltos, el número máximo de retransmisiones posibles en cada salto, y el empleo o no de rutas redundantes. Para calcular dicha fiabilidad, deberemos considerar en primer lugar la posibilidad de que cada paquete que circula por una ruta se pueda retransmitir hasta N veces en cada uno de los enlaces que la forman, si las $(N-1)$ primeras transmisiones fallan. En este contexto, considerando dichas retransmisiones independientes, la fiabilidad, P_s , del enlace s dentro de una ruta puede estimarse como:

$$P_s = 1 - (1 - p_s)^N \quad (1)$$

donde p_s representa la probabilidad de correcta recepción de cada paquete o PDR del enlace s . A partir de (1), es posible calcular la fiabilidad extremo a extremo de una cierta ruta j mediante la siguiente ecuación, considerando que la ruta está formada por S saltos independientes:

$$P^j = \prod_{s=1}^S P_s = \prod_{s=1}^S (1 - (1 - p_s)^N) \quad (2)$$

El empleo de múltiples rutas redundantes independientes puede mejorar la fiabilidad entre los nodos origen y destino debido a que un paquete será correctamente recibido en el nodo destino aunque sólo se transmita de forma correcta por una de ellas. La fiabilidad extremo a extremo considerando J rutas redundantes independientes puede calcularse empleando la siguiente ecuación:

$$P = 1 - \prod_{j=1}^J (1 - P^j) \quad (3)$$

donde $(1 - P^j)$ representa la probabilidad de que un paquete no alcance el nodo final por la ruta j . La expresión (3) permite calcular la fiabilidad extremo a extremo cuando se emplean múltiples rutas redundantes, únicamente conociendo el nivel de PDR de cada uno de los enlaces.

B. Retardo

El retardo que sufre un paquete está directamente relacionado con el número de veces que ha tenido que ser retransmitido para conseguir llegar correctamente al destino. Así, el retardo que sufre un paquete en un enlace se puede asociar a una variable aleatoria que sigue una distribución geométrica. Una variable aleatoria geométrica es una variable aleatoria discreta que representa el número de repeticiones necesarias de un experimento de Bernoulli para obtener el primer éxito. Si consideramos como un éxito a la correcta recepción de un mensaje en un enlace, y que dicho éxito puede producirse tras varios intentos o retransmisiones periódicas, entonces podemos asociar el retardo en el enlace al número de retransmisiones o el tiempo que se ha tardado en conseguir dicho éxito. Si D_s es la variable aleatoria que representa el número de intentos fallidos hasta que aparece el primer éxito en el enlace s entre dos nodos, su función de densidad de probabilidad seguirá la siguiente ecuación:

$$f_s(D_s = d) = p_s \cdot (1 - p_s)^d \quad (4)$$

donde p_s representa de nuevo el nivel de PDR del enlace s . A partir de la función de densidad de probabilidad expresada en (4), es posible calcular la función de distribución de probabilidad del retardo del enlace s como:

$$F_s(D_s = d) = \sum_{k=0}^d f_s(D_s = k) = 1 - (1 - p_s)^{d+1} \quad (5)$$

A partir de la ecuación (5), puede calcularse el máximo número de retransmisiones, d_β , que podría garantizarse en un enlace con una determinada probabilidad β mediante:

$$\beta = 1 - (1 - p_s)^{d+1} \quad (6)$$

$$d_\beta = \frac{\text{Log}(1 - \beta)}{\text{Log}(1 - p_s)} - 1 \quad (7)$$

A partir del número de retransmisiones necesarias calculado, y considerando un cierto tiempo T_R entre retransmisiones, se puede estimar el máximo retardo que sufrirá un paquete en un enlace con una determinada PDR. En los equipos IEEE 802.15.4 disponibles, $T_R=0.864\text{ms}$, aunque para no perder generalidad en este trabajo se evalúa el retardo en número de retransmisiones.

El retardo extremo a extremo en una ruta de S saltos es la suma de S variables aleatorias geométricas. Se puede demostrar que dadas dos variables aleatorias independientes

enteras, D_1 y D_2 (que podrían representar el retardo en número de retransmisiones de dos enlaces), con funciones de densidad de probabilidad $f_1(D_1=d)$ y $f_2(D_2=d)$, la variable $D^j=D_1+D_2$ tiene una función de densidad de probabilidad dada por la convolución de las funciones de densidad individuales de D_1 y D_2 :

$$f^j(D^j = d) = f_1(D_1 = d) * f_2(D_2 = d) \quad (8)$$

La variable D^j representa el retardo que sufriría un paquete en una cierta ruta j formada por dos saltos. Se puede extender este resultado a la suma de S variables aleatorias independientes (los S enlaces que forman una ruta), es decir, $D^j=D_1+D_2+\dots+D_S$. En este caso, se podrá calcular la función de densidad de probabilidad de D^j por inducción a partir de sucesivas convoluciones. A partir de la función de densidad de probabilidad $f(D^j=d)$ se puede calcular la función de distribución del retardo de una ruta $F^j(D^j=d)$.

En este contexto, el aumento del número de rutas redundantes puede mejorar el retardo que sufre un paquete entre origen y destino porque dicho retardo es el mínimo retardo producido en las distintas rutas establecidas. Con J rutas redundantes independientes, cada una con un retardo D^j , con $1 \leq j \leq J$, el retardo que experimentará un paquete será:

$$D = \min(D^1, D^2, \dots, D^J) \quad (9)$$

Puede demostrarse que la función de distribución de D es:

$$F(D = d) = 1 - \prod_{j=1}^J (1 - F^j(D^j = d)) \quad (10)$$

La obtención de la función de distribución del retardo extremo a extremo mediante (10) permite estimar el retardo máximo que experimentará un paquete con cierta probabilidad β . Esto permitirá determinar si las rutas establecidas van a poder cumplir los requisitos de retardo demandados por la aplicación con una determinada probabilidad o nivel de exigencia β (por ejemplo un retardo máximo de 5 con una probabilidad de $\beta=0.95$). El valor de β aquí puede ser el mismo o no al empleado en la ecuación (7) para enlaces individuales.

III. PROTOCOLO DE ENCAMINAMIENTO MULTICAMINO CON QoS

El mecanismo de encaminamiento diseñado tiene como principal objetivo el establecimiento de una o varias rutas redundantes que posibiliten la comunicación entre dos nodos de forma que se cumplan los requisitos de QoS impuestos por las aplicaciones. Para este establecimiento, el mecanismo asume una gestión centralizada, de forma que es un nodo coordinador el que determina las rutas a emplear para la comunicación entre cualquier par de nodos. Este tipo de gestión es habitual en redes con estrictos requisitos de QoS, como las típicamente soportadas por WirelessHART, para tomar un mayor control sobre las comunicaciones.

El mecanismo de encaminamiento propuesto se basa en el conocimiento del nivel de PDR de cada uno de los enlaces de la red por el coordinador. Gracias a esa información, dicho nodo se encarga del establecimiento de las rutas redundantes necesarias para comunicar un cierto nodo origen con un cierto nodo destino siguiendo el siguiente procedimiento:

1. *Cálculo de nueva ruta.* El nodo coordinador ejecuta el algoritmo de Dijkstra para hallar la ruta óptima entre los

nodos origen y destino. El algoritmo tiene como entrada un grafo formado por los nodos de la red como vértices, y el coste asociado a cada arco viene dado por la métrica de retardo de enlace de la ecuación (7). La salida del algoritmo de Dijkstra es la ruta entre los nodos origen y destino cuya suma de retardos individuales de cada enlace es mínima, y es candidata para ser añadida al conjunto de rutas redundantes.

2. *Estimación de fiabilidad y retardo.* Una vez determinada la ruta redundante a añadir al conjunto de rutas que comunican los nodos origen y destino, se procede a estimar la fiabilidad y el retardo que experimentarían dichos nodos si se les asignan las rutas determinadas. Esta estimación se realiza empleando las ecuaciones (3) y (10).

3. *Finalización o preparación de cálculo de nueva ruta.* Los niveles de fiabilidad y retardo estimados se comparan con los niveles requeridos. Si con las rutas establecidas es posible alcanzar los niveles requeridos, el algoritmo termina con la asignación de dichas rutas y la comunicación entre los nodos ya puede establecerse. Si con las rutas establecidas no es posible alcanzar los niveles de QoS requeridos, y no se ha alcanzado un número máximo de rutas K_{max} , se realiza una nueva iteración del algoritmo para añadir una nueva ruta redundante. Para ello, se vuelve a ejecutar el paso 1 sin considerar los nodos ya utilizados en las rutas establecidas, con el objetivo de obtener rutas redundantes distintas.

IV. ANÁLISIS DE RENDIMIENTO Y EFICIENCIA

El análisis del rendimiento y la eficiencia del protocolo de encaminamiento propuesto se ha realizado mediante simulación considerando un escenario cuadrado de 100mx100m en el que se distribuyen de forma aleatoria una serie de nodos. Cada uno de estos nodos trata de establecer una comunicación con el nodo coordinador, ubicado en el centro del escenario. Para la comunicación entre cada par de nodos se ha considerado un modelo de propagación en interiores genérico que considera los efectos de *pathloss* y *shadowing*. Se asume que cada nodo transmite al coordinador el nivel de PDR que experimenta con cada uno de sus nodos vecinos, para que éste pueda establecer las correspondientes rutas hacia él con el suficiente nivel de QoS, considerando un máximo de $N=4$ retransmisiones en cada enlace, y un máximo de $K_{max}=10$ rutas redundantes. Los niveles de QoS demandados vienen definidos en términos de fiabilidad ($ReqR$) y máximo retardo ($ReqD$) con una probabilidad de $\beta=0.95$, es decir, el retardo marcado por $ReqD$ ha de cumplirse al menos en el 95% de las transmisiones.

La Fig. 1 muestra la fiabilidad y retardo extremo a extremo evaluados en el escenario propuesto empleando el protocolo de encaminamiento diseñado para el establecimiento de rutas. Los resultados presentados en esta figura consideran diferentes números de nodos en el escenario, y los requisitos impuestos por las aplicaciones de $ReqR=0.99$ y $ReqD=7.5$. Mientras las barras ilustran los valores medios obtenidos de fiabilidad y retardo, las líneas muestran los percentiles 5% y 95%. Como puede observarse, mediante el protocolo de encaminamiento diseñado se consigue alcanzar el mínimo nivel de fiabilidad requerido, y el retardo que experimentan los paquetes es menor al demandado en más del 95% de las transmisiones. Estos resultados demuestran el potencial del protocolo propuesto para el establecimiento de comunicaciones con estrictos niveles de QoS.

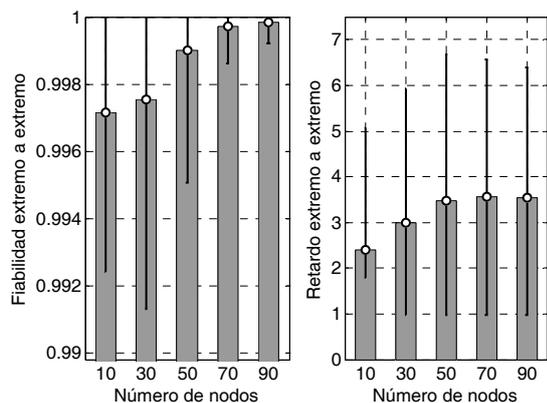


Fig. 1. Fiabilidad y retardo extremo a extremo para $ReqR=0.99$ y $ReqD=7.5$.

Además de proporcionar los niveles de QoS demandados, una de las ventajas de protocolo propuesto es su potencial para detectar nodos a los que no va a ser posible proporcionar los niveles de QoS demandados. Para el escenario evaluado, la Fig. 2 muestra el porcentaje de comunicaciones en las que el protocolo detectó la imposibilidad de proporcionar los niveles de QoS demandados, y no estableció las rutas correspondientes entre origen y destino. Como puede observarse, este evento ocurre más frecuentemente en los escenarios con baja densidad de nodos, mientras que prácticamente no aparece cuando el número de nodos es elevado. Asimismo, es de destacar que a medida que se aumentan los requisitos de fiabilidad, $ReqR$, disminuye la posibilidad de establecer rutas con suficiente nivel de QoS.

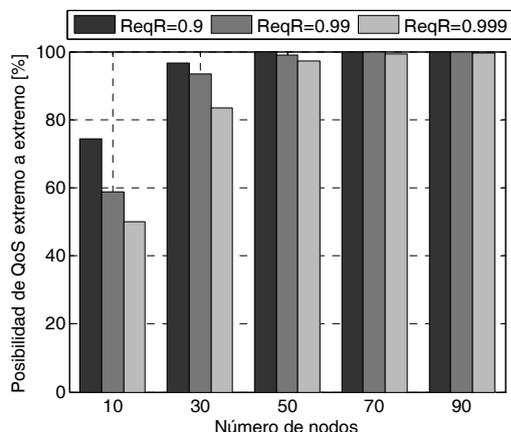


Fig. 2. Posibilidad de establecimiento de rutas con el QoS demandado considerando $ReqD=7.5$.

El alcance de los niveles de QoS demandados se consigue en parte gracias al empleo de rutas redundantes, que mejoran la fiabilidad y el retardo extremo a extremo. Sin embargo, la excesiva transmisión de datos de forma redundante sería perjudicial para la red porque disminuiría su eficiencia y capacidad. La Fig. 3 muestra la cantidad de paquetes recibidos por duplicado en el nodo destino, mostrando el valor medio en forma de barra, y líneas verticales para los percentiles 5% y 95%. El protocolo es más eficiente cuanto más se aproximan estos valores a la unidad, puesto que lo ideal sería no recibir ningún paquete por duplicado para emplear de forma eficiente el canal. Como puede observarse, el aumento del número de nodos en la red se traduce en una mejor utilización del canal porque un mayor número de nodos aumenta la posibilidad de encontrar rutas fiables y de menor retardo entre origen y destino, de forma que se emplea

un menor número de rutas redundantes. El efecto contrario ocurre cuando se aumentan los requisitos de fiabilidad mediante el parámetro $ReqR$, tal y como se observa en la misma figura. En efecto, imponer requisitos más estrictos aumenta el número de rutas redundantes necesarias entre origen y destino, y por ello aumenta la cantidad de paquetes que pueden llegar por duplicado.

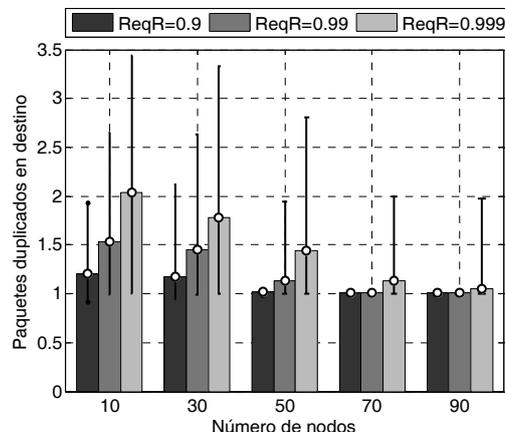


Fig. 3. Paquetes recibidos por duplicado en el nodo destino con $ReqD=7.5$.

V. CONCLUSIONES

El presente trabajo propone un protocolo de encaminamiento capaz de proporcionar estrictos niveles de QoS gracias al empleo de múltiples rutas redundantes. Este protocolo se basa en una serie de métricas definidas para la evaluación robusta de la fiabilidad y retardo en redes ad-hoc. Los resultados obtenidos muestran el potencial del protocolo propuesto para satisfacer los niveles de QoS demandados por las aplicaciones. Además, demuestran su eficiencia, y su capacidad para detectar situaciones en las que no se pueden establecer rutas que cumplen los niveles de QoS requeridos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación a través del proyecto CENIT FASyS (CEN-20091034).

REFERENCIAS

- [1] Web oficial del proyecto FASyS: <http://www.fasys.es/>
- [2] H. Badis and K. A. Agha, "QOLSR, QoS Routing for Ad Hoc Wireless Networks using OLSR", *Wiley European Transactions on Telecommunications*, vol. 15, no. 4, pp. 427–442, 2005.
- [3] M. Sheng et. al, "Routing Protocol with QoS Guarantees for Ad-Hoc Network", *Electronics Letters*, vol. 39, pp. 143–45, Enero 2003.
- [4] M. Wang and G.-S. Kuo, "An Application-Aware QoS Routing Scheme with Improved Stability for Multimedia Applications in Mobile Ad Hoc Networks", *Proc. IEEE VTC*, pp. 1901–05, Sept. 2005.
- [5] S. J. Lee and M. Gerla, "AODV-BR: Backup routing in ad hoc networks", *Proc. IEEE WCNC*, pp. 1311–1316, 2000.
- [6] Aristotelis Tsirigos and Zygmunt J. Haas, "Analysis of Multipath Routing—Part I: The Effect on the Packet Delivery Ratio", *IEEE Transactions On Wireless Communications*, vol. 3, No. 1, Enero. 2004.
- [7] S.M. Mostafavi et. Al, "Delay minimisation in multipath routing using intelligent traffic distribution policies", *IET Commun.*, 2011, vol. 5, Iss. 10, pp. 1405–1412.
- [8] D. S. J. De Couto et. al, "A High Throughput Path Metric for MultiHop Wireless Routing", *Proc. ACM MobiCom*, pp. 134–146, 2003.
- [9] Richard Draves et. al, "Routing in Multi-Radio, Multi-Hop Wireless Mesh Networks", *Proc. ACM MobiCom*, pp. 114–128, 2004.
- [10] H. Aiache et. al, "LAETT: A load dependent metric for balancing Internet traffic in Wireless Mesh Networks", *Proc. IEEE MASS*, pp. 629–634, Oct. 2008.