

Mitigación de la Dependencia a Largo Plazo del Tráfico en Redes WLAN IEEE 802.11

Por Ing. David Rincón e Ing. Cristina Cano

Introducción

La versión original de este artículo corresponde a la *Revista IEEE América Latina*, vol. 5, no. 6 (octubre 2007): 471-478, que ha cedido amablemente los derechos para su publicación en nuestra revista.

Los modelos de teletráfico tienen su origen en la telefonía convencional, basada en conmutación de circuitos, y fueron heredados por los diseñadores de redes de datos debido a la facilidad con la que se calculan las probabilidades de bloqueo y el grado de servicio. Diferentes estudios basados en mediciones reales demuestran que el tráfico transportado por las redes de conmutación de paquetes se puede caracterizar de una forma más próxima a la realidad mediante modelos de tráfico basados en procesos fractales o con escalado en lugar de los modelos tradicionales basados en tiempos entre llegadas exponenciales y procesos de llegadas de Poisson [1-2]. Aunque el fenómeno de escalado se ha estudiado con detalle en el caso de las redes de datos fijas, no hay demasiados trabajos en el campo de las redes inalámbricas.

Este trabajo se centra en el tráfico de las redes WLAN en su modalidad *ad-hoc*, para lo cual se estudian los efectos ocasionados en el tráfico por el Método de Acceso al Medio (MAC) y por el modelo de propagación. El estudio se ha realizado utilizando el simulador ns-2. Se han elaborado una serie de escenarios —sin movilidad, en esta fase del estudio— con diferentes configuraciones, mediante los cuales se puede estudiar la modificación de las características del tráfico al variar parámetros como la carga de la red, el tamaño de paquete, el modelo de fuente, o el modelo de propagación del canal, entre otros. La sistemática seguida en el análisis ha permitido aislar el efecto de cada parámetro en las características del tráfico. Se han estudiado las series de tiempo entre llegadas y tasa agregada, así como el fenómeno de escalado, tanto en emisión como en recepción. Esto ha permitido caracterizar el tráfico y obtener la influencia de todos los procesos intermedios —MAC, pérdidas, colas— en las características del tráfico final. Para asegurar la validez de las simulaciones, se han comparado los resultados obtenidos en escenarios reales y se ha confirmado que, al menos cualitativamente, los resultados son coherentes.

El presente artículo se organiza de la siguiente manera: en la Sección II se presentan los fenómenos fractales detectados en teletráfico y su estimación. La Sección III describe conceptos básicos de las redes *ad-hoc* y WLAN que permitirán entender los resultados obtenidos. La Sección IV describe el trabajo realizado por otros autores sobre las propiedades fractales presentes en el tráfico WLAN. En la Sección V se definen los escenarios de las simulaciones, cuyos resultados se recogen en la Sección VI. En la Sección VII se presentan los experimentos reales. Por último, en la Sección VIII se detallan las conclusiones y las líneas de trabajo futuro.

Fenómenos fractales y su estimación

Los modelos fractales se han utilizado para modelar series temporales en muchas áreas de la ciencia contemporánea como la biología, la economía y la meteorología. Su principal característica es la similitud de comportamiento cuando se les observa a diferentes escalas temporales o espaciales. El descubrimiento de estas características en el modelado de tráfico telemático no surgió hasta que se pudo disponer de series de tráfico de alta resolución en la década de 1990 [2]. Se ha demostrado que el tráfico transportado en Internet y otras redes de datos presenta una correlación notable y, por lo tanto, una memoria de la que carecen los modelos tradicionales, basados en estadísticas exponenciales [1-3].

Autosimilitud

La autosimilitud exacta —*exact self-similarity*— se define como la apreciación de una estructura estadísticamente similar a lo largo de un amplio margen de escalas temporales, es decir, la señal mantiene su distribución estadística aunque se varíe la escala de observación. El parámetro de Hurst (H) mide el grado de autosimilitud de los procesos. Su valor oscila entre 0,5 y 1, siendo el proceso más autosimilar cuanto más se acerque H a 1. Un proceso exactamente autosimilar es no estacionario por definición [4], y puede modelar el tráfico acumulado —bytes o paquetes llegados hasta el instante t —.

El tráfico acumulado de las redes de ordenadores no es exactamente autosimilar, sino más bien asintóticamente autosimilar, ya que las distribuciones estadísticas tienden a ser iguales cuando la escala de agregación tiende a infinito, es decir, a las frecuencias más bajas del proceso.

Los procesos autosimilares suelen estar asociados a distribuciones con colas fuertes —*heavy tails*—, lo que significa que la probabilidad de aparición de valores muy elevados no es menospreciable, y a su vez conlleva una gran varianza estadística que puede llegar a ser infinita. En teletráfico esto se traduce en la aparición de ráfagas de actividad y silencio de duraciones muy largas —la conocida *burstiness* del tráfico, que en este caso aparece en múltiples escalas temporales— [4].

Dependencia a largo plazo

La autosimilitud y la dependencia de largo plazo —*Long Range Dependence*, LRD— están íntimamente relacionadas, debido a que la serie de incrementos o diferencias de un proceso autosimilar —no estacionario— es un proceso LRD (estacionario). Por eso la intensidad de tráfico —bytes o paquetes por unidad de tiempo— se suele modelar con procesos LRD, que heredan la autosimilitud del tráfico acumulado.

Un proceso estocástico presenta LRD si su autocorrelación decae a un ritmo lento —inferior al de la exponencial—. En otras palabras, el tráfico medido en un cierto instante τ_0 y el medido en un instante posterior $\tau_0 + \lambda$ mantienen una correlación importante aunque la separación temporal λ sea muy elevada, fenómeno que no se da en los procesos de llegadas de Poisson [4]. Por eso se dice que los procesos LRD tienen memoria.

La definición de los procesos LRD establece que su densidad espectral satisface

$$S(f) \approx \frac{c_f}{|f|^\alpha} \quad \text{para } f \rightarrow 0 \quad 1$$

donde el parámetro de escalado α es una medida cualitativa de la intensidad del fenómeno LRD y se expresa habitualmente reescribiendo el parámetro de Hurst $H = (1 + \alpha)/2$, mientras que c_f tiene dimensiones de segundo momento o varianza y puede ser interpretado como una medida cuantitativa de la LRD [3].

La dependencia a largo plazo del tráfico tiene un impacto significativo en el comportamiento de las colas en los distintos elementos de red —conmutadores, encaminadores— que no puede ser predicho con los actuales modelos de análisis basados en llegadas Poissonianas, como se demuestra en [1-2, 4, 5, 7]. La distribución del número de paquetes en espera de servicio presenta una cola fuerte —*heavy tail*— que decrece subexponencialmente, a diferencia de las llegadas de Poisson, donde la distribución de ocupación de la cola decrece exponencialmente. Esto implica que la posible solución de aumentar la capacidad de las memorias tampón (*buffers*) de los dispositivos de red para disminuir la pérdida de paquetes es inútil, ya que una pequeña disminución de las pérdidas significaría un notable incremento del retardo de los paquetes.

La transformada de ondículas discreta

La DWT —*Discrete Wavelet Transform*— es una herramienta que permite la estimación de los parámetros LRD de una forma precisa y computacionalmente eficiente [3]. Dada una señal $x(n)$, los coeficientes $d_x(j, k)$ de la transformada *wavelet* (ondícula) de $x(n)$ a la escala j y en tiempo k se definen como el producto escalar de la señal de entrada y las ondículas $\psi_{j,k}$,

$$d_x(j, k) = \langle x, \psi_{j,k} \rangle \quad 2$$

donde las ondículas se construyen mediante la dilatación y el desplazamiento de la ondícula madre —*mother wavelet*— ψ_0 :

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \psi_0(2^j t - k), \quad j = 1 \dots J, k \in Z \quad 3$$

La DWT puede interpretarse como un banco de filtros como el de la figura 1, donde se filtra la señal con un filtro paso bajo $h(n)$ y otro paso alto $g(n)$, y se itera el proceso J veces en la subbanda baja. Los filtros se obtienen de

la ondícula madre ψ_0 . El resultado es un análisis multiresolución en $J+1$ octavas o subbandas, en el que la señal se descompone en una aproximación a baja frecuencia, $a_x(J,k)$, y un conjunto de detalles de alta frecuencia, $d_x(j,k)$, para $j=1\dots J$.

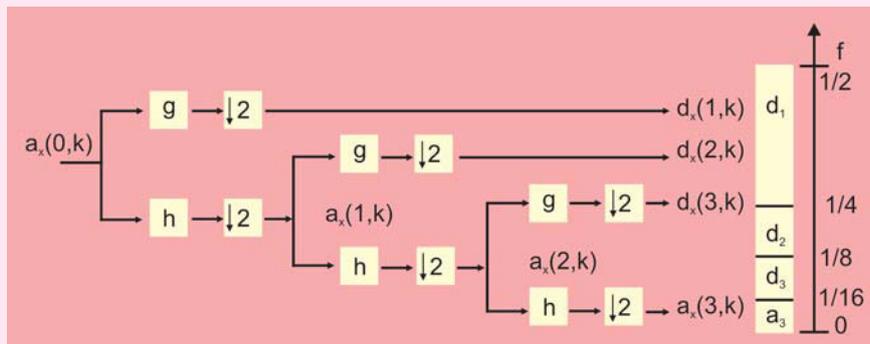


Figura 1 DWT como banco de filtros, para un análisis a $J=3$ escalas. A la derecha, las subbandas del espectro normalizado —las escalas altas corresponden a bajas frecuencias, y viceversa—

Estimación de la LRD con el diagrama LogScale

La principal herramienta para la detección, identificación y estimación de fenómenos fractales es el diagrama LogScale (LD) [3,6]. Consiste en el cálculo del segundo momento μ_j de los coeficientes de ondícula $d_x(j,k)$ de cada octava j de la DWT, que se puede interpretar como la potencia de la señal en dicha subbanda frecuencial. Si el proceso es autosimilar o LRD y se representa $\log(\mu_j)$ en función de j , se obtiene una recta con pendiente α y una altura relacionada con cf . Los dos parámetros de la LRD pueden estimarse por regresión lineal ponderada. El estimador LD está prácticamente libre de sesgo y su varianza es próxima a la óptima [3].

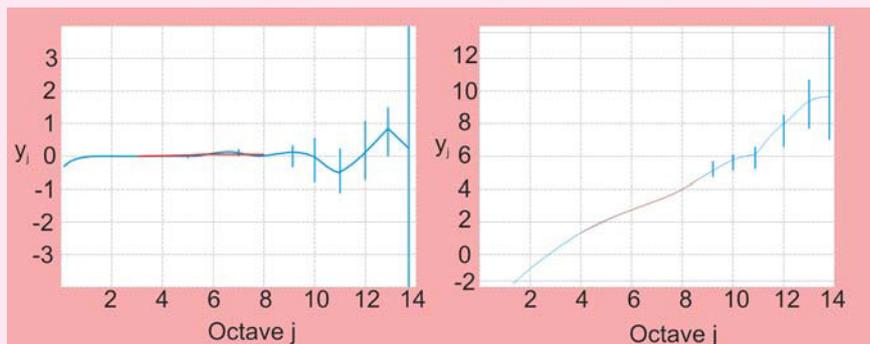


Figura 2 Diagramas LogScale de un proceso Poissoniano con $H=0,5$ —espectro plano, pendiente $\alpha=0$ — y de un proceso LRD con $H=0,9$ —espectro donde predominan las bajas frecuencias / escalas altas, con pendiente $\alpha=0,8$ —

Redes Ad-hoc y WLAN

La característica fundamental de las redes *ad-hoc* es que pueden configurarse por sí solas, sin la intervención de una administración centralizada [8]. Estas redes son también conocidas como *Mobile AdHoc Networks* (MANET). Los equipos que forman una red *ad-hoc* realizan funciones de encaminamiento, de forma que dos terminales que no están en la misma zona de cobertura pueden comunicarse a través del resto de los equipos. Se pueden formar redes *ad-hoc* sobre diversas tecnologías base inalámbricas, como las redes WLAN definidas en IEEE 802.11 o las WPAN —*Wireless Personal Area Networks*— definidas por los estándares 802.15 y Bluetooth. En este estudio nos centramos en IEEE 802.11.

Redes WLAN

Las redes WLAN —*Wireless Local Area Network*— son sistemas inalámbricos de transmisión de datos utilizados como alternativa a las redes LAN cableadas o como una extensión de estas. Utilizan tecnología de radiofrecuencia, lo que permite la movilidad de los terminales, y sus características más importantes son la flexibilidad y facilidad de despliegue.

El protocolo IEEE 802.11 es un estándar que define los dos niveles más bajos de la arquitectura OSI —capas física y de enlace—. La especificación utilizada en este trabajo es la IEEE 802.11b, que trabaja a velocidades de hasta 11 Mbps en la frecuencia de 2,4 GHz.

Métodos de acceso al medio en 802.11

El método de acceso al medio en 802.11 se basa en una modificación de la técnica CSMA/CA —*Carrier Sense Medium Access / Collision Avoidance*— denominada función de coordinación distribuida —*Distributed Coordination Function, DCF*—. Cada trama enviada se confirma mediante el envío de mensajes ACK (*Acknowledgements*). El terminal con tramas para transmitir monitoriza continuamente el medio, y una vez que lo encuentra disponible, espera un intervalo de tiempo DIFS —*DCF Interframe Space*— y transmite. En el caso de la transmisión de un ACK se fuerza un espaciado entre tramas SIFS —*Short IFS*— que al ser más corto que un DIFS permite que el ACK sea el primer paquete que se envía después de una trama, disminuyendo la probabilidad de colisiones (Figura 3).

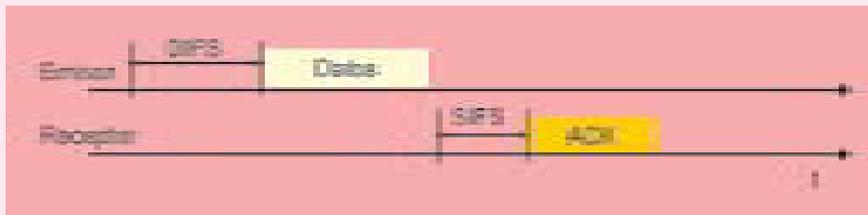


Figura 3 Ejemplo de envío de ACKs

Existe un segundo modo de funcionamiento denominado RTS/CTS, que es el utilizado habitualmente en situaciones reales. Esta opción evita situaciones generadas por los problemas de terminal oculto y terminal expuesto, en los que se genera una gran cantidad de colisiones que el mecanismo DCF es incapaz de evitar. Para eludir estos problemas la estación que quiere transmitir envía primero un paquete RTS —*Request to Send*— y espera que la estación receptora le indique que está libre para recibir las tramas con un paquete CTS —*Clear to Send*—, como se ilustra en la figura 4.

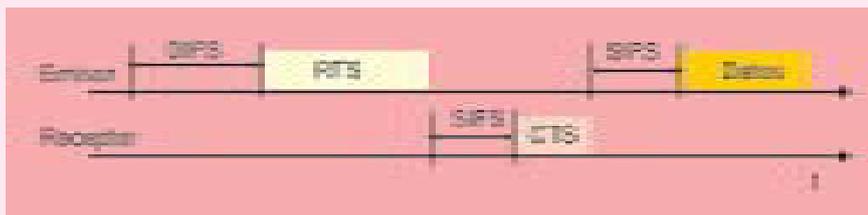


Figura 4 Esquema temporal del envío utilizando RTS/CTS

Trabajos relacionados

Según la información de la que disponemos, existen pocas contribuciones al estudio de las propiedades fractales en redes WLAN. A continuación se revisan brevemente las aportaciones más relevantes. Liang [18] utilizó las propiedades fractales encontradas en redes *ad-hoc* reales para realizar predicción de tráfico.

Yu y Petropolu [19] estudiaron la propagación de tráfico autosimilar a través del medio radio y observaron que la fractalidad podía desaparecer si las memorias intermedias eran grandes en comparación con la capacidad del canal.

Un estudio más cercano al objetivo de este artículo es el de Tickoo y Sikdar [20], que, a nuestro entender, constituye el mayor esfuerzo hecho hasta la fecha para estudiar las propiedades del tráfico fractal y su influencia en redes 802.11. En dicho artículo se presenta un modelo analítico del tiempo entre llegadas en 802.11 y se demuestra un efecto de mitigación de la LRD provocado por el propio mecanismo de acceso al medio. El estudio se completa con simulaciones donde se utiliza tráfico fractal en emisión y se expone la posibilidad de obtener un tráfico multifractal con la agregación de diversos flujos.

Escenarios de simulación

Las simulaciones desarrolladas en nuestro trabajo se dirigen a determinar las características del tráfico que circula por la red. Se inyecta un tráfico con características conocidas a un nodo, y se evalúan las características del tráfico a la salida, por lo que se contemplan todos los mecanismos intermedios —propagación, MAC, etc.— como una “caja negra” que realiza un filtrado del tráfico entrante.

Parámetros comunes en las simulaciones

Algunos parámetros se mantienen constantes en todos los escenarios. Por ejemplo, se utiliza el método de acceso 802.11 DCF, disciplina de cola DropTail, tamaño de cola 50 paquetes y velocidad del enlace 11 Mbps. El resto de los parámetros MAC siguen el estándar HR-DSSS 802.11.

Fuentes de tráfico y protocolo de transporte

Las fuentes utilizadas como tráfico de entrada han sido de tasa constante

—*Constant Bit Rate*, CBR—, Poisson —módulo externo al simulador— y dos generadores de tráfico LRD: agregación de fuentes de Pareto y fuente Web. Como protocolo de transporte se ha utilizado UDP, por lo tanto no habrá retransmisiones a nivel de transporte —las habría si se usara TCP— y sólo aparecerán retransmisiones del nivel MAC.

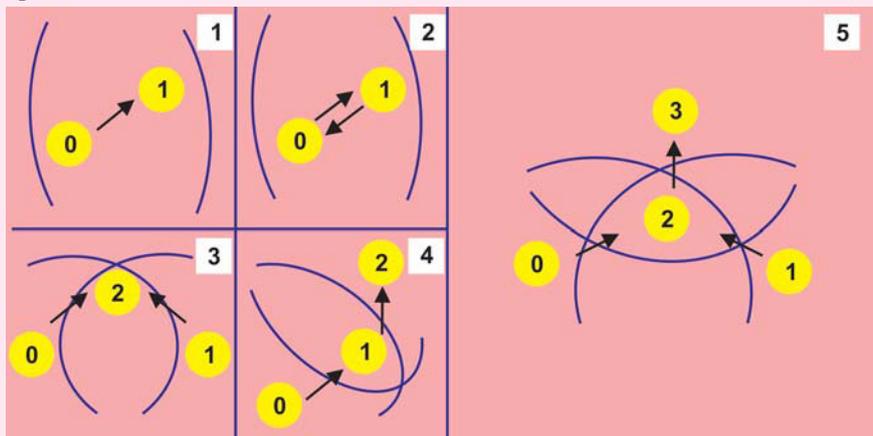


Figura 5 Topologías de los escenarios de simulación. Se detallan las coberturas de cada nodo y la dirección de las transmisiones

Modelos de propagación

Los modelos simulan los efectos de la propagación y las interferencias multicamino, mediante combinaciones de expresiones deterministas —para la atenuación por distancia— y procesos aleatorios —para las interferencias y rebotes—. En ns-2 se implementan de manera que cuando se recibe un paquete se calcula la potencia de recepción de la señal; si se encuentra por debajo del umbral de recepción, el paquete se marca como erróneo y es eliminado por el nivel MAC.

En este estudio se han utilizado tres modelos de propagación. El primero y más sencillo es el modelo TwoRayGround, que considera dos caminos de propagación, siendo uno de ellos directo y el otro un reflejo en tierra. Este modelo —al igual que el de espacio libre— predice la potencia recibida como una función determinista con la distancia, modelando el rango de comunicación como un círculo ideal. Por lo tanto, o bien se pierden todos los paquetes o se reciben todos. Si los nodos están suficientemente cerca, no habrá pérdidas.

El segundo modelo es el de desvanecimientos lentos o *shadowing*, que reproduce las sombras o pérdidas de cobertura producidas por objetos estáticos o con movimiento lento. Este modelo introduce más complejidad, y añade los efectos de la propagación multicamino mediante una probabilidad de pérdida que sigue una distribución log-normal.

El tercer modelo es externo a ns-2 —no se incluye en la instalación estándar— y simula los desvanecimientos rápidos de Ricean y Rayleigh [10, 11]. Este modelo incluye los efectos de desvanecimiento (*fading*) producidos por los movimientos del transmisor, receptor u otros objetos en el entorno. Rayleigh se modela como un caso particular de Ricean, cuando no hay visión directa ($K=0$). El modelo de desvanecimiento lento (*shadowing*) implementado en ns-2 aproxima el desvanecimiento mediante una variable aleatoria log-normal, pero no incluye la correlación en tiempo necesaria para simular errores a ráfagas, requerida en Ricean/Rayleigh.

Topología de los escenarios

En la figura 5 se presentan los diferentes escenarios de simulación. El escenario 1 es el más sencillo, y simula un enlace radio punto a punto unidireccional entre dos nodos separados 50 metros. El número de

simulaciones que resulta de combinar los diversos parámetros libres (Tabla 1) es elevado, con la finalidad de determinar qué parámetros tienen impacto en los resultados y cuáles se pueden obviar y mantener constantes en posteriores escenarios.

En el escenario 2 se ha simulado un enlace bidireccional entre dos nodos. En este caso los dos nodos luchan por el acceso al medio, pero gracias al mecanismo DCF se evitarán un gran número de colisiones. Este escenario introduce el efecto de compartición de canal en el tráfico analizado.

El tercer escenario simula el efecto del nodo oculto, en el que dos nodos que no se detectan entre sí envían paquetes a un tercero, lo que generará colisiones y podrá afectar al tráfico. Los nodos opuestos (0 y 1) están separados 300 m, mientras que ambos están separados del tercero por 158 m.

El cuarto escenario simula el efecto de reenvío multisalto (*multihop*), e introduce retardos adicionales. El nodo 0 intenta enviar a un nodo que está fuera de su zona de cobertura y para ello recurre al nodo 1, que se encuentra entre ambos.

En el último escenario se simula de nuevo el efecto de nodo oculto. La diferencia es que el nodo receptor retransmite todos los paquetes hacia el nodo 3 pues los nodos emisores están fuera de la zona de cobertura de este último nodo.

Para todos los escenarios se analizan diversas configuraciones de carga —simétrica y asimétrica—, de pérdidas, y de fractalidad del tráfico —en grado y simetría entre nodos—.

Análisis de los resultados

Para cada simulación realizada se han analizado tanto la traza de entrada (emisión) como la de salida (recepción) de cada nodo del escenario, con la finalidad de ver el efecto de lo que denominamos como “caja negra”; es decir, el efecto

que los diferentes procesos —MAC, multiplexado, retardos en cola, pérdidas por propagación y retransmisiones, entre otros— tienen sobre el tráfico a la salida de cada nodo WLAN. Las trazas analizadas son las de nivel de aplicación —aunque se han hecho comprobaciones a nivel MAC—. De la traza se extrae la serie numérica de dos columnas correspondiente a la marca temporal —instante de generación o llegada— y el tamaño del paquete. De estos datos se obtiene:

1) La serie de tiempos entre llegadas, calculando la diferencia de cada tiempo de llegada/salida y el posterior.

2) La tasa instantánea agregada, que corresponde al volumen de bytes que llegan en una ranura temporal (*slot*).

De estas series se calculan la media, la varianza, los histogramas y el efecto de escalado —diagrama LogScale—.

Resultados de las simulaciones

Consideraciones previas

Para validar los resultados se han realizado simulaciones previas en escenarios fijos —para caracterizar correctamente el comportamiento LRD de las fuentes de tráfico— y pruebas simples en escenarios inalámbricos —para calibrar el comportamiento de ciertos parámetros que aparecen implícita o explícitamente en las simulaciones WLAN de ns-2—. A continuación se describen brevemente las conclusiones de estas simulaciones de calibración que servirán para interpretar correctamente los parámetros utilizados y los resultados obtenidos. En [9] se puede encontrar una descripción detallada y completa de la metodología utilizada.

En primer lugar hay que destacar que la velocidad de transferencia efectiva (*throughput*) en 802.11 es muy inferior a los 11 Mbps que se suelen mencionar como velocidad de transmisión. La tasa efectiva

depende de diversos factores. Los ACK y el preámbulo PLCP —se usa el preámbulo largo— se transmiten a 1 Mbps. La tasa efectiva disminuye si se utiliza el mecanismo RTS/CTS. Además es necesario tener en cuenta las ineficiencias debidas a los intervalos de inactividad (*backoff*). Las tasas obtenidas en las simulaciones de prueba se corresponden con las calculadas en [12]. Estas tasas máximas teóricas son las que se han utilizado para determinar la carga a generar —en porcentaje de la tasa máxima—.

En las primeras simulaciones se observó que en las trazas de recepción existe un mínimo tiempo entre llegadas, como se verá en los resultados descritos más adelante. En todas las simulaciones posteriores se puede observar que se mantiene constante, si se mantienen el método de acceso y el tamaño de paquete. Este espaciado está directamente relacionado con el mínimo tiempo necesario para enviar un paquete. Este tiempo se calcula a partir de los tiempos de espera del mecanismo de acceso —DIFS y SIFS—, los tiempos de transmisión del paquete según su tamaño a 11 Mbps, los tiempos de transmisión de los ACK, los paquetes RTS/CTS y el preámbulo [9].

Cuando existen varios nodos accediendo al medio se produce, como veremos más adelante, la aparición de múltiples o armónicos de este tiempo mínimo. Estos armónicos se producen al tener varios nodos enviando paquetes seguidos —*back-to-back*—. Este efecto produce que al intercarse paquetes de otro nodo el mínimo tiempo de transmisión para un nodo sea algo mayor del doble —en el caso que se intercale un paquete—, del triple —en el caso que se intercalen dos—, etc. Esto se debe a que cuando un nodo intenta transmitir y se encuentra el medio ocupado esperará a que el medio esté libre (T_{tx}), después esperará el tiempo de inactividad y transmitirá el paquete (T_{tx}). El tiempo total en este caso será el doble de T_{tx} más el tiempo de inactividad.

En algunas simulaciones es necesario que existan pérdidas para comprobar el efecto del modelo de propagación o de las colisiones. Cuando un paquete se pierde por cualquier motivo, el nodo que ha enviado el paquete lo retransmite, porque no recibe el ACK correspondiente. Si se alcanza el número de retransmisiones máximo —definido en *ns-defaults.tcl*— el nodo emisor descarta el paquete y se considera como una pérdida efectiva. Estos retrasos que provocan las retransmisiones pueden llevar al límite la cola del nodo emisor, por lo que los paquetes se pierden por desbordamiento de la cola IFQ, que se encuentra entre el nivel de aplicación y el MAC [13].

El porcentaje de pérdidas es un parámetro importante en aquellos casos en los que se simulan los efectos del canal. Para todas aquellas pruebas en las que existen pérdidas —como las de modelos de propagación o por colisiones— estas se acotarán a las tasas de error típicas de un enlace radio —BER entre 10^{-6} y 10^{-4} —, teniendo en cuenta la mejora introducida por los mecanismos de corrección de errores [15]. En nuestro caso consideraremos como tasas de pérdidas de trama —PER, *Packet Error Rate*— aceptables las que estén en el margen comprendido entre el 1% y el 4% de los paquetes.

Tipo de fuente	Acceso al medio	Tamaño de paquete	% tasa	Modelo de propagación
CBR Poisson Autosimilar (0,5/ 0,7/ 0,9) Fuente Web	CSMA/CA RTS/CTS	400 bytes 1000 bytes	10 % 50% 90%	TwoRayGround Shadowing Ricean

Tabla I Parámetros de las simulaciones

A continuación se describen los resultados más relevantes obtenidos en las simulaciones. Los resultados se dividen en tres grandes grupos:

- 1) los escenarios sin pérdidas —modelo TwoRayGround en los escenarios 1, 2 y 4—;
- 2) escenarios con pérdidas —escenarios 3 y 5 con pérdidas por colisión y cualquier escenario con modelos de desvanecimientos *shadowing* y Ricean/Rayleigh que suponen pérdidas por propagación—;
- 3) pruebas asimétricas —escenarios 2, 3, 4 y 5 en los que los parámetros de los nodos emisores son distintos—.

Resultados de los escenarios sin pérdidas

Para el caso de una fuente de Poisson, los histogramas de tiempo entre llegadas en recepción muestran claramente el carácter exponencial para tasas de generación bajas (10%) mientras que a tasas del 50% y 90% se observa una concentración de los valores alrededor de un valor bajo. Este efecto lo causa la saturación de la cola, que hace que los paquetes salgan con un tiempo entre llegadas mínimo (Ttx), es decir, salen seguidos —*back-to-back*—. Cuando varios nodos acceden al medio aparecen armónicos del mínimo tiempo de transmisión (Figura 6) comentado en un apartado anterior.

En el diagrama LogScale, a cargas del 90% se observa la caída de las frecuencias altas de la señal (Figura 7). Este comportamiento es el esperado, pues si se transmite a una tasa elevada aquellos paquetes que salgan más juntos serán eliminados o se retrasarán en cola, lo que es equivalente a eliminar las altas frecuencias de la señal —escalas bajas—.

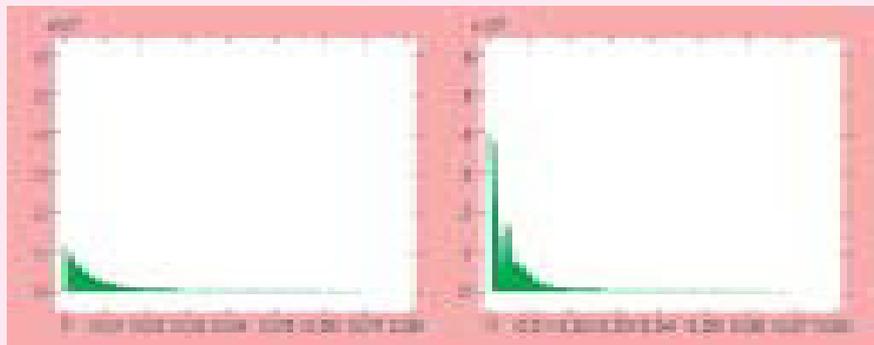


Figura 6 Histogramas del tiempo entre llegadas, para emisión (izquierda) y recepción (derecha) en el escenario 2. Las unidades de eje de abscisas corresponden a milisegundos

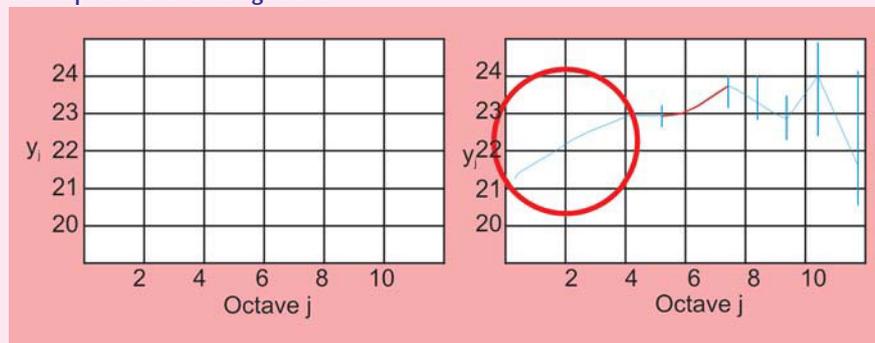


Figura 7 Diagramas LogScale de tasa agregada emitida (izquierda) y recibida (derecha) en el escenario 1, para una fuente de Poisson. Se puede observar la disminución de las altas frecuencias —escalas bajas— del proceso

Un resultado llamativo es el efecto localizado en el histograma de tiempo entre llegadas del escenario 4, en el que se simula el efecto de reenvío. En este caso puede observarse el segundo armónico del tiempo mínimo de transmisión (Figura 8). Este efecto se puede justificar

teniendo en cuenta que las transmisiones de los dos nodos emisores no son independientes. El nodo 1 intenta transmitir justo cuando el nodo 0 acaba de hacerlo —ya que retransmite todo lo que recibe—. Por lo tanto, la probabilidad de que uno de los nodos transmita durante mucho tiempo ráfagas seguidas es muy baja, y es más probable que se intercalen paquetes del otro nodo.

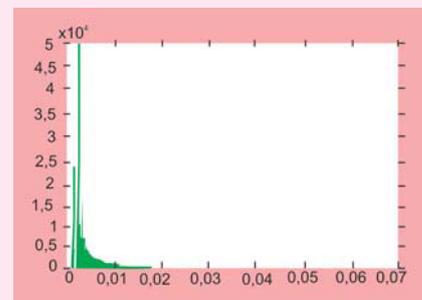


Figura 8 Histograma del tiempo entre llegadas en el nodo 1 del escenario 4 para fuente autosimilar con $H=0,9$. El eje de abscisas corresponde a milisegundos

Cuando el tráfico introducido en los escenarios sin pérdidas es LRD, se reproducen los mismos efectos en el tiempo entre llegadas. En cuanto al comportamiento en las diferentes escalas los diagramas LogScale no sufren un cambio significativo en recepción respecto a los de emisión, excepto cuando la carga es alta —por encima del 50 %—, en el que se reproduce el efecto de suavizado ilustrado en la figura 7.

Resultados de los escenarios con pérdidas

Cuando se producen pérdidas —tanto por colisiones como por propagación— se puede observar en los histogramas de tiempo entre llegadas la aparición simultánea de valores muy altos aunque poco probables —correspondientes a las retransmisiones— y gran cantidad de valores bajos —correspondientes a los paquetes que salen seguidos—. Tanto estos retrasos como los tiempos mínimos están provocando que las altas frecuencias del proceso del tráfico se vean incrementadas. En el diagrama LD se encuentra este efec-

to traducido en un aumento de las escalas bajas, que corresponden a las frecuencias altas (Figura 9). Nótese el efecto de mitigación de la LRD: en emisión H es 0,682 con [0,637, 0,727] como intervalos de confianza del 95%, mientras que en recepción H disminuye a 0,508 [0,486, 0,530].

Cuando se utiliza el modelo de desvanecimientos lentos o *shadowing* —recordemos que es un modelo sin correlación temporal— se puede observar que, adicionalmente, las escalas altas de la señal disminuyen (Figura 10). Nuestra interpretación es que la falta de correlación en tiempo está introduciendo pérdidas aleatorias no correladas, lo que destruye las componentes de baja frecuencia de la señal, es decir, la memoria del proceso.

La combinación de ambos efectos produce un aplanado del espectro de la señal, haciendo que el diagrama LogScale tienda a parecerse más al de una fuente con LRD menor — $H=0,528$ [0,489, 0,566] en recepción— que a una fuente autosimilar — $H=0,784$ [0,725, 0,843] en emisión—. Se está haciendo que el tráfico tienda a un proceso de Poisson. El efecto no es absoluto; es decir, mitiga la LRD pero no la elimina del todo. Por ejemplo, cuando la fuente tiene un grado de autosimilitud mayor, como $H=0,93$, el diagrama a la salida no es plano pero la pendiente disminuye a $H=0,77$ [9]. Al superponer las pérdidas por colisión y por propagación se observa

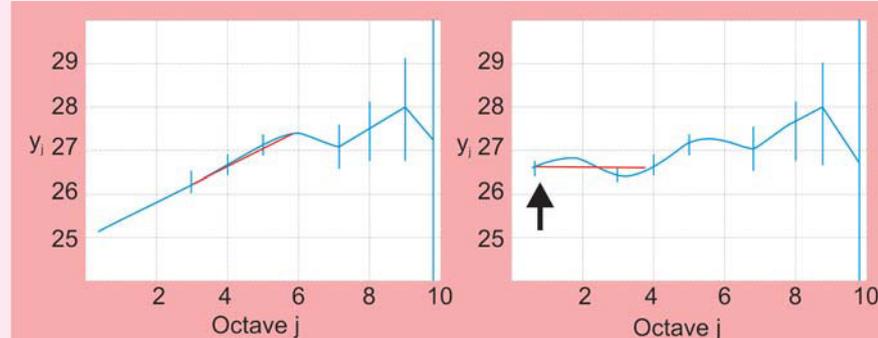


Figura 9 Diagramas LogScale de tasa agregada en emisión a) y recepción b) de tráfico autosimilar $H=0,7$ en el escenario 1 usando el modelo de Rayleigh

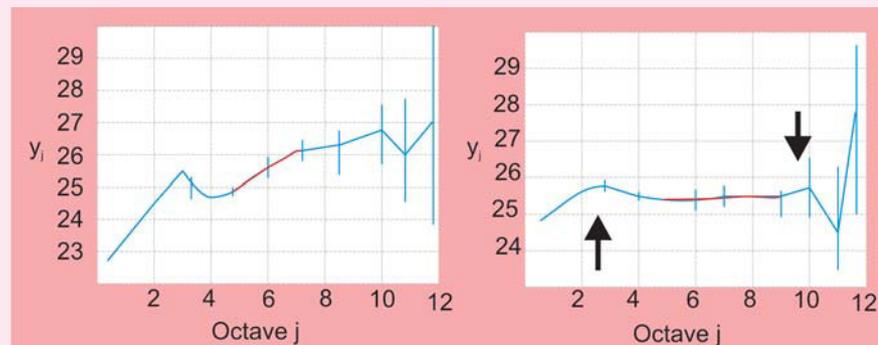


Figura 10 Diagramas LogScale de tasa agregada en emisión a) y recepción b) de tráfico autosimilar $H=0,784$ en el escenario 1 usando el modelo *shadowing* que las escalas bajas aumentan de forma más pronunciada, reforzándose el efecto de mitigación de la LRD.

Resultados de las pruebas asimétricas

Las pruebas asimétricas realizadas que proporcionan resultados interesantes son las realizadas en el escenario 3, en el que se simula el efecto de nodo oculto. Estas pruebas se realizan con el modelo de propagación sin pérdidas, para aislar sus efectos.

En la primera prueba un nodo transmite con una fuente con parámetro de Hurst $H=0,5$ —es decir, con dependencia a corto plazo—, mientras que el otro

transmite un tráfico con $H=0,9$ —alta correlación y LRD—. La traza conjunta en el nodo receptor tiene un diagrama LogScale prácticamente idéntico al encontrado para la traza con H mayor. Este fenómeno es el esperado teóricamente cuando se combina un grado de autosimilitud bajo con uno alto, tal como se demuestra en [14]. Ambos flujos obtienen el mismo número de pérdidas debido a que la tasa total generada es la misma.

En la segunda prueba uno de los nodos transmite al 5 % de la tasa máxima mientras que el otro transmite al 45 % de la tasa máxima. Se puede apreciar un desequilibrio importante en cuanto a pérdidas: el nodo que tiene una tasa inferior sale perjudicado. La traza conjunta sigue exactamente la misma distribución que la del nodo con tasa mayor; es decir, el nodo de tasa alta enmascara al de tasa menor.

Pruebas reales

Los estudios basados en simulaciones pueden estar sesgados por las simplificaciones inevitables e inherentes al propio concepto de simulación, y es conveniente compararlas con la realidad, razón por la que la validación de los escenarios simulados en escenarios reales es de vital importancia. En nuestro caso se ha reproducido uno de los escenarios de simulación, concretamente el primero —dos nodos con un modelo de propagación de desvanecimientos lentos— con el objetivo de comprobar que el comportamiento del escalado del tráfico es el encontrado en las simulaciones.

Escenarios

La intención es realizar pruebas reales del escenario 1 en un entorno con un modelo de propagación conocido para ver el efecto de las pérdidas en el fenómeno de escalado de la señal. Una parte de las pruebas se realizó en un esce-

nario de interiores —correspondiente al edificio de la Escuela Politécnica Superior de Castelldefels, Barcelona—, en el que el modelo de propagación se aproxima al *shadowing* con parámetro β entre 4 y 6 —ya que es un entorno interior y las pruebas se realizarán sin línea directa de visión—. También se ha realizado una prueba en exteriores, concretamente en el paseo marítimo de la playa de Castelldefels, porque conocemos el modelo de propagación de dicha zona. En [15] se realiza un estudio de dicho escenario en el que se caracteriza la potencia recibida en función de la distancia. Los resultados muestran que el modelo de propagación se aproxima a un modelo *shadowing* con parámetro $\beta \approx 2,7$.

Para estas pruebas se dispuso de dos ordenadores portátiles con una tarjeta wireless 802.11b/g. La conexión entre ambos se realizó en modo *ad-hoc*, a 11Mbps y en un canal que no se encontraba ocupado por otros nodos —previamente se verificó que no había interferencias en la banda WLAN—. Se desactivó la opción RTS/CTS y se acotó el número máximo de retransmisiones. La generación de tráfico autosimilar real se realizó mediante el generador de tráfico *flashudp* [16] y el generador de trazas FGN *fft-fgn* [17]. La carga fue del 50 % de la tasa máxima.

Resultados

Como primera conclusión hay que destacar la gran variabilidad introducida por el canal en situaciones en las que existe movimiento alrededor de los nodos, sobre todo debido a las personas que se movían alrededor de los equipos. Este efecto provoca una gran variabilidad en la traza resultante reflejada por ráfagas de paquetes (Figura 11). En el diagrama LogScale este hecho se refleja en una pendiente $\alpha > 1$, lo que indica la presencia de no estacionariedad en la serie temporal.

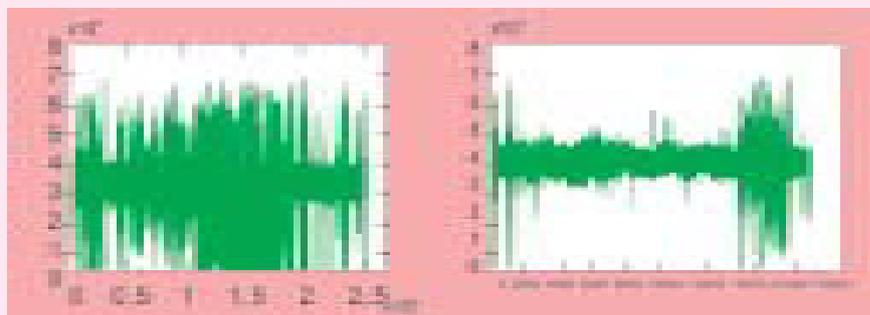


Figura 11 Comparación de la traza de tasa agregada —ancho de banda instantáneo, a la escala de 10 ms, para un entorno con alta movilidad (izquierda) y con baja movilidad (derecha)—

Para evitar los efectos no estacionarios se intentó minimizar la movilidad de personas y objetos alrededor de los equipos. Los resultados del análisis del grado de autosimilitud para estos intervalos sí que reflejan los efectos encontrados en las simulaciones. La figura 12 muestra la mitigación de la LRD obtenida en una de las pruebas realizadas en el escenario interior. El valor de H en emisión es de 0,742 [0,727, 0,757], mientras que en recepción disminuye hasta 0,554 [0,543, 0,564] evidenciando el cambio de las características frecuenciales de la señal y el suavizado del tráfico.

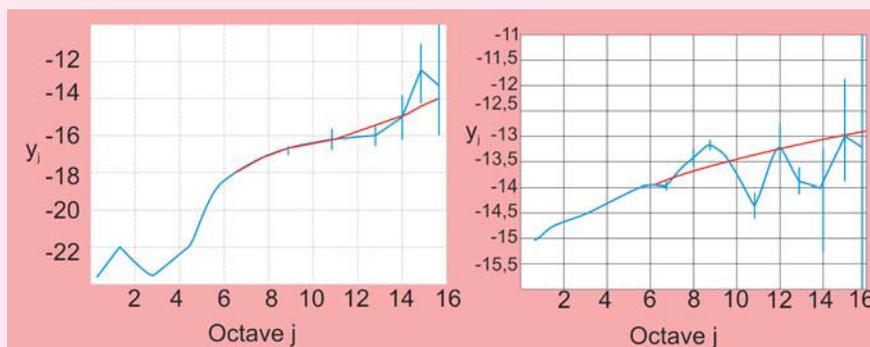


Figura 12 Diagramas LogScale de la serie de tiempo entre llegadas del escenario de interiores en emisión (izquierda) y en recepción (derecha)

Tal y como se trató en las simulaciones el resultado de las pérdidas y de los retardos ocasionados se traducen en una mitigación de la autosimilitud del proceso y de una destrucción del fenómeno LRD. Aunque cuantitativamente haya discrepancias —explicables por la mayor complejidad de los escenarios reales—, este es, cualitativamente, el mismo comportamiento encontrado en las pruebas reales, por lo que damos por validado el efecto de mitigación de LRD hallado en las simulaciones.

Conclusiones

En este trabajo se estudia la influencia del método de acceso MAC 802.11 y de los modelos de propagación en las características de tráfico cuando este presenta LRD. Se ha identificado la cola MAC y las pérdidas como mitigadores del tráfico en las escalas bajas y altas, respectivamente. Cuando ambos efectos se combinan el grado de fractalidad del tráfico disminuye. Los resultados se han corroborado con pruebas reales en las que se ha encontrado el mismo efecto.

En cuanto a los escenarios con pérdidas hay que destacar la variación de los resultados según el modelo de propagación. Recordemos que el modelo de desvanecimientos lentos no tiene correlación en tiempo (memoria) mientras que el de Ricean sí la tiene. Con ambos modelos las

escalas bajas —frecuencias altas— de la señal se ven aumentadas, lo que indica que existe una variación importante en los tiempos entre llegadas debida a retrasos y a envíos consecutivos provocados por la ocupación de cola de emisión, siendo ambos efectos consecuencia de las pérdidas. Con el modelo *shadowing*, a diferencia de Ricean, las escalas altas disminuyen, probablemente debido a esta falta de correlación en tiempo de la implementación ns-2 del modelo. Ambos fenómenos repercuten en la autosimilitud del tráfico de forma que se ve mitigada, es decir, se destruye la memoria a largo plazo del proceso.

Nuestros experimentos confirman y amplían los resultados analíticos desarrollados por Tickoo y Sikdar [20], en lo que respecta a la mitigación introducida por los mecanismos MAC en las altas frecuencias —escalas bajas—. Dichos autores realizan simulaciones para corroborar sus análisis, pero son complejas y no permiten determinar exactamente la influencia de cada parámetro en los resultados. Nuestro trabajo incluye los efectos de la propagación, es más sistemático —lo que permite identificar el impacto de cada parámetro— y aporta pruebas reales que corroboran los resultados de las simulaciones.

Este estudio se puede ampliar con escenarios de simulación más complejos, incluyendo movilidad, un mayor número de nodos, y el uso de TCP. También puede hacerse extensivo a fuentes de tráfico multifractal, en los que el escalado no es constante en el tiempo. Finalmente, sería interesante realizar el resto de escenarios simulados en un entorno real —por ejemplo, el efecto de nodo oculto— de forma que sea posible corroborar los resultados obtenidos en los distintos escenarios. 

Referencias bibliográficas

- [1] W.E Leland, M.S. Taqqu, W. Willinger, D.V. Wilson "On the selfsimilar nature of Ethernet traffic (extended version)". *IEEE/ACM Transactions on Networking* Vol. 2 Issue, 1 pp. 1–15, February 1994.
- [2] O. Cappe, E. Moulines, J.-C. Pesquet, A.P. Petropulu, X. Yang "Longrange dependence and heavy-tail modeling for teletraffic data". *IEEE Signal Processing Magazine*. Vol. 19 Issue 3, pp. 14–27, May 2002.
- [3] P. Abry y D. Veitch "A wavelet-based joint estimator of the parameters of long-range dependence". *IEEE Transactions on Information Theory* Vol. 45 Issue: 3 pp. 878–897, April 1999.
- [4] K. Park, W. Willinger, "Self-similar network traffic: an overview", en K. Park, W. Willinger (editors), *Self-similar network traffic and performance evaluation*. Wiley, 2000.
- [5] W. Stallings. *High-Speed Networks and Internets: Performance and Quality of Service*. 2ª Edición. Prentice-Hall, 2002.
- [6] P. Abry, D. Veitch. "Code for the estimation of Scaling Exponents". http://www.cubinlab.ee.mu.oz.au/~darryl/secondorder_code.html
- [7] M. Aurelio y A. Monroy, "Uso de la transformada wavelet para el estudio de tráfico fractal en redes de comunicaciones". *Revista Ingeniería*, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Vol. 7 No. 1 pp. 11–24, Junio 2002.
- [8] D. Remondo, "Tutorial on Wireless Ad Hoc Networks". En Proceedings of the 2nd International Working Conf. on Performance Modelling and Evaluation of Heterogeneous Networks (HETNETS' 04): Tutorials. University of Bradford, U.K., 2004, pp. 20-30.
- [9] C. Cano, "Estudio de la fractalidad del tráfico en redes Ad-hoc sobre WLAN", Proyecto Fin de Carrera (MsC Thesis). Departamento de Ingeniería Telemática, Escola Politècnica Superior de Castelldefels, Universitat Politècnica de Catalunya, Febrero 2006.
- [10] R. J. Punnoose, P. V. Nikitin y D. D. Stancil, "Efficient Simulation of Ricean Fading within a Packet Simulator" http://www-ece.rice.edu/~jingpu/moar/ricean_sim.pdf
- [11] Antenna and Radio Communications Group, CMU, "Additions to the NS network simulator to handle Ricean and Rayleigh fading" <http://www.ece.cmu.edu/wireless/>
- [12] J. Jun, P. Peddabachagari, M.I. Sichitiu "Theoretical Maximum Throughput of IEEE 802.11 and its Applications" http://www4.ncsu.edu/~jjun/index_files/full_tmt.pdf
- [13] The Network Simulator, ns-2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [14] Y. Fan, N. D. Georganas, "On merging and splitting of self-similar traffic in high-speed networks", Proceedings of ICC'95, Seoul, Korea, pp.8A.1.1-6, 1995.
- [15] D. Ruíz y M. Oliveras, "Redes mesh basadas en puntos de acceso inteligentes 802.11 open source (III)", Proyecto Fin de Carrera (MsC Thesis). Departamento de Ingeniería Telemática, Escola Politècnica Sup. de Castelldefels, Univ. Politècnica de Catalunya, Febrero 2006.
- [16] Frank Saka. Frank's homepage. <http://www.hep.ucl.ac.uk/~fs/>
- [17] V. Paxson, "Fast Approximation of Self-Similar Network Traffic". Technical report LBL-36750/UC-405, April 1995. <http://ita.ee.lbl.gov/html/contrib/fft-fgn.html>
- [18] Q. Liang, "Ad Hoc Wireless Network Traffic – Self-Similarity and Forecasting", *IEEE Communications Letters*, vol. 6 n° 7, pp. 297-299, July 2002.
- [19] J. Yu and A. Petropolu, "On propagation of Self-Similar Traffic through an Energy-Conserving Wireless Gateway". Proceedings of
- [20] O. Tickoo and B. Sikdar, "On the Impact of IEEE 802.11 MAC on Traffic Characteristics", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 21 n° 2, pp. 189-203, February 2003.