



## ANÁLISIS DE MÁXIMO DESEMPEÑO PARA WLAN OPERANDO A TASAS FIJAS O ADAPTIVAS USANDO EL ESTÁNDAR IEEE 802.11 a/b/g<sup>1</sup>

### FIXED OR ADAPTIVE RATE MAXIMUM THROUGHPUT ANALYSIS FOR IEEE 802.11 a/b/g WLAN'S

Walter Grote H.<sup>2</sup> Claudio Ávila C.<sup>3</sup> Alexis Molina B.<sup>3</sup>

Recibido 2 de agosto de 2007, aceptado 2 de octubre de 2007

Received: August 2, 2007 Accepted: October 2, 2007

#### RESUMEN

En este trabajo se presenta un análisis simple, pero efectivo, de desempeño (*throughput*) de redes de área local inalámbricas (WLAN: *Wireless Local Area Networks*) operando bajo la familia de estándares IEEE 802.11 a/b/g. El análisis considera la influencia del tamaño de los paquetes, parámetros de configuración de los dispositivos (uso del protocolo RTS/CTS o acceso básico, tamaño de la ventana de contienda inicial, tasas de transmisión) como el efecto del número de dispositivos que conforman la red. El objetivo de este estudio es que los administradores de este tipo de redes puedan estimar los efectos que tiene sobre el desempeño la configuración de los dispositivos de la red. Los resultados obtenidos mediante este análisis constituyen una cota máxima del desempeño de la red, ya que, con el objetivo de evitar un análisis estocástico, se asume ausencia de colisiones e interferencia electromagnética en el canal.

Palabras clave: Redes locales inalámbricas, control de acceso al medio, utilización.

#### ABSTRACT

*In this publication a simple, but effective, throughput analysis for WLANs (Wireless Local Area Networks) operating according to the IEEE 802.11 a/b/g family of standards is presented. The influence of data packet sizes, device configuration parameters (RTS/CTS or basic access protocol, initial contention window, transmission rate) and the effect of the number of devices of the network are considered. The purpose of this study is to provide network administrators an insight of how network configuration parameters affect network performance. Results of this kind of analysis will provide an upper bound on network performance, since they do not consider the effect of collisions and electromagnetic interference.*

*Keywords: Wireless LAN, medium access control, throughput.*

#### INTRODUCCIÓN

El estándar IEEE 802.11 fue desarrollado para proveer conectividad a terminales móviles, como los de las redes de telefonía celular y de las redes de acceso local inalámbricas (WLAN: *Wireless Local Access Network*), [1]. Hay diversas versiones de este estándar que se caracterizan por una letra que se agrega a la denominación. En este trabajo se analiza de manera simple el desempeño máximo que puede lograrse de redes operando con los protocolos IEEE 802.11 a/b/g, de lo cual pueden desprenderse consideraciones importantes de la efectividad que pueden tener algunos procedimientos de configuración básicos.

Parámetros importantes son la ventana de contienda, tasa de transmisión, el número de terminales y el tipo de aplicación.

La figura 1 ilustra el contexto dentro del cual se realiza este trabajo, donde un punto de acceso (*Access Point*) provee conectividad a diversos terminales inalámbricos (clientes) para acceder a Internet por medio de un Router. Esta configuración se conoce como de Infraestructura. En cambio, cuando todos los terminales se comunican entre sí sin intervención de un punto de acceso como mediador, se habla de una red ad hoc.

<sup>1</sup> Este trabajo ha sido financiado parcialmente por los proyectos PBCT ACT-11-04 y UTFSM 23.05.21

<sup>2</sup> Departamento de Electrónica. Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM). Valparaíso, Chile. E-mail: wgrote@elo.utfsm.cl

<sup>3</sup> Departamento de Electrónica. Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM). Valparaíso, Chile.



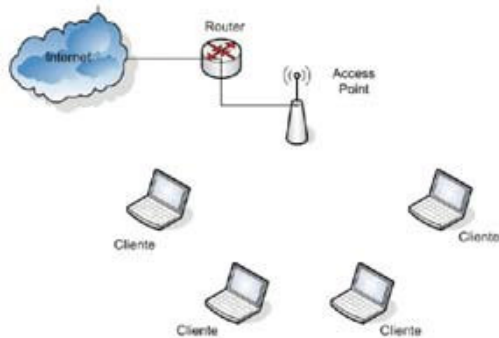


Figura 1. WLAN trabajando en modo infraestructura.

En el protocolo IEEE 802.11, un mecanismo de acceso al medio (MAC: *Medium Access Control*) es la función de coordinación distribuida (DCF: *Distributed Coordination Function*), basada en un protocolo de acceso aleatorio múltiple con detección de portadora con esquivación de colisión (CSMA/CA: *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*), [1]. El estándar también especifica otro tipo de acceso al medio coordinado (PCF: *Point Coordination Function*), capaz de proveer un acceso al medio libre de colisiones, pero esta función no está implementada en muchos de los dispositivos disponibles en el mercado y, por ende, no será analizado.

DCF opera mediante un contador de inhibición de transmisión (*backoff*), cuyo valor inicial se escoge aleatoriamente entre 0 y un valor máximo de ventana de contienda (*CW*: *Contention Window*). El valor inicial de la ventana de contienda es  $CW_{min}$ . Esta ventana se incrementa en forma exponencial binaria cada vez que el dispositivo que transmite experimenta contienda, de modo que  $CW = 2^i \cdot CW_{min}$ , en la  $i$ -ésima retransmisión. El contador se decrementa a partir del valor inicial cada vez que se registra un tiempo de intervalo de contienda ocioso después de una transmisión exitosa, seguida de un intervalo DIFS (ver figura 2). Una vez que el contador alcanza la cuenta 0, el dispositivo transmite. Cuando se experimenta una transmisión exitosa, todos los terminales de la red que están en el rango de cobertura del dispositivo que emite la señal se informan del tiempo que requerirá esa transmisión y detienen la cuenta regresiva del contador de inhibición por ese intervalo de tiempo, como ilustra la figura 2.

En esta figura se muestran dos líneas horizontales, donde se representa el tiempo, de izquierda a derecha. En la parte inferior se ilustra la operación del contador de *backoff* de un dispositivo, que comienza su cuenta en 8 y la detiene en 5, cuando otro dispositivo de la red interrumpe con su transmisión el conteo. Una vez que se emite el acuse de recibo ACK, se espera un tiempo DIFS para reiniciar

decrementando el contador. Cuando el contador alcanza la cuenta 0, el dispositivo transmite.

La DCF ofrece dos alternativas de acceso al canal, el Acceso Básico o *2-way-handshaking*, caracterizado por el hecho de que una vez recibido el paquete de datos correctamente por la estación destino, ésta envía un acuse de recibo (ACK: *Acknowledgment*) confirmando que la transmisión fue exitosa. Este mecanismo es el que se muestra en la figura 2.

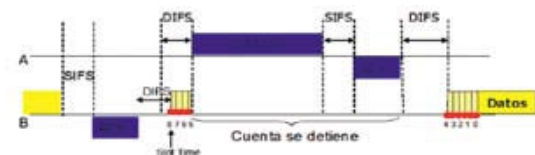


Figura 2. Mecanismo de acceso básico.

El segundo mecanismo de acceso al medio es conocido bajo el nombre de RTS/CTS o *4-way-handshaking*, donde el dispositivo envía un RTS (*Request To Send*) para reservar el canal y la estación de destino responde con un CTS (*Clear To Send*) confirmando la reserva de éste. Análogamente al procedimiento usado en el modo de acceso básico, el paquete RTS se transmite una vez que el contador de inhibición ha llegado a la cuenta 0. Luego se envía el paquete de datos y el destino responde con un ACK. La figura 3 muestra un diagrama temporal representativo de este modo de acceso. La cuenta regresiva del contador de *backoff*, se detiene cuando el dispositivo se informa mediante el mensaje RTS acerca del tiempo que será destinado por otro para una transmisión exitosa (NAV: *Network Allocation Vector*). CTS es un mensaje que copia esta información, considerando que parte del tiempo ya fue utilizado.

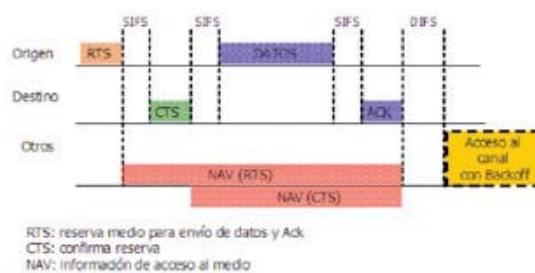


Figura 3. Mecanismo de acceso RTS/CTS.

El protocolo RTS/CTS es aconsejable de usar cuando el tamaño de los paquetes es cercano a 1.500 bytes y cuando está presente el fenómeno del terminal oculto. Una descripción más exhaustiva del protocolo IEEE 802.11 se puede encontrar en el estándar [1] y sus modificaciones posteriores.

## ANÁLISIS TEÓRICO DE DESEMPEÑO DE LOS PROTOCOLOS IEEE 802.11 a/b/g

Se presenta a continuación un análisis teórico de la tasa efectiva, una de las medidas de desempeño más comúnmente utilizada para este tipo de redes inalámbricas. Este análisis se enfoca en determinar cuáles son las cotas máximas a las que se puede aspirar operando los terminales en condiciones ideales. Este análisis, aunque es optimista, permite establecer la influencia que ejercen el número de terminales y los parámetros de configuración de los dispositivos sobre el desempeño esperado de la red. A pesar de que es sencillo, se ha observado que muchos administradores de redes WLAN operando con este protocolo lo desconocen, citando resultados que son imposibles de alcanzar al contrastarlos con estas medidas. Para realizar este estudio se supone que el canal está libre de errores y que no se producen colisiones. Expresado de otra manera, se supone que todas las transmisiones son exitosas en su primer intento. En la referencia [2] se esboza un análisis menos exhaustivo al que se propone en esta publicación. Un análisis más exacto de lo que ocurre en el caso de una red operando a plena carga, considerando las colisiones, se puede encontrar en [3] y [4].

### Throughput

Se puede definir la tasa efectiva, o *throughput* ( $S$ ), de acuerdo a lo señalado por la ecuación (1).

$$S = \frac{\text{paqueteIP}}{\text{tiempo colisiones} + \text{tiempo tx exitosa} + \text{tiempo ocioso}} \quad (1)$$

Para determinar las cotas máximas de esta medida de desempeño se obvian las colisiones, como ya fue señalado. Esto presenta la ventaja de que se pasa de un análisis probabilístico a uno determinístico. Con esta consideración, la relación (1) queda de la forma expresada en la ecuación (2):

$$S = \frac{\text{paqueteIP}}{\text{tiempo tx exitosa} + \text{tiempo ocioso}} \quad (2)$$

Considerando lo anterior, es posible obtener fácilmente el desempeño asociado a las variantes a/b/g del estándar IEEE 802.11. Los parámetros involucrados en una transmisión usando el protocolo IEEE 802.11 a/b/g, se muestran en la tabla 1.

### Carga Útil

Como carga útil se supondrá el tamaño de paquete  $PL$ , expresado en bits. Este paquete corresponde al tamaño de un paquete IP y su tamaño máximo para una red Ethernet,

a la cual normalmente se conecta un AP, es de 1.500 bytes. El desempeño de una red inalámbrica depende del tamaño del paquete, como se desprenderá del análisis siguiente.

### Tiempo Transmisión Exitosa

El tiempo de transmisión exitosa (TTE), ya sea de un TM o del AP, debe considerar todos los tiempos involucrados desde que se inicia y hasta que termina una transmisión. Esto incluye el tiempo de transmisión del encabezado y de los datos, los tiempos de propagación de la onda electromagnética, los distintos espacios entre tramas (IFS: *InterFrame Space*), como así también la respuesta correspondiente de acuse de recibo. Nótese que los bits del encabezado y de la carga útil se transmiten a distinta tasa, siendo  $R_D$  la tasa de transmisión de los datos, mientras que los encabezados se transmiten a la tasa de transmisión  $R_H$ .

Si se supone que está operando en modo básico, el tiempo asociado a una transmisión exitosa está dado por la ecuación (3), de acuerdo a la figura 2. Las siglas y el significado de los términos de la ecuación (3) y (4) se encuentran detallados en la Tabla 1.

$$TTE = 2 \cdot (T_{PHY} + \delta) + \frac{MAC + ACK}{R_H} + \frac{PL}{R_D} + T_{SIFS} + T_{DIFS} \quad (3)$$

Si se considera que se opera bajo el protocolo RTS/CTS, entonces el tiempo asociado a una transmisión exitosa está dado por la ecuación (4), basado en un análisis de la figura 3:

$$TTE = 4 \cdot (T_{PHY} + \delta) + \frac{RTS + CTS + MAC + ACK}{R_H} + \frac{PL}{R_D} + 3 \cdot T_{SIFS} + T_{DIFS} \quad (4)$$

### Tiempo Ocioso

Corresponde al tiempo en promedio que permanece el equipo transmisor, ya sea AP o TM, en el algoritmo de *backoff*. Como en el análisis de esta publicación toda transmisión es exitosa (no hay contienda), se tendrá que la ventana de contienda siempre corresponderá, en promedio, a  $CW_{min}/2$ , por lo que se tiene que el tiempo ocioso (TO) corresponde a lo señalado por la ecuación (5), donde  $\sigma$  corresponde a un intervalo de contienda (*Slot Time*):

$$TO = \frac{CW_{min} \cdot \sigma}{2} \quad (5)$$

$CW_{min}$  es un parámetro configurable por el administrador de redes para muchos de los dispositivos comerciales. El valor defecto es el que señala la tabla 1, pero  $CW_{min}$  puede adoptar los siguientes valores: 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024. Mientras mayor sea este valor, se disminuye la probabilidad de colisiones de la red, pero por otro lado aumenta el retardo en transmitir un paquete. En la tabla 1 también aparece el valor por defecto de  $CW_{max}$ . Este parámetro determina el máximo valor que puede asumir la ventana de contienda durante las retransmisiones, limitando el incremento de la venta de contienda.

Tabla 1. Parámetros de transmisión IEEE 802.11 a/b/g, [1]

Estándar IEEE802.11				
Definición	Parámetro	Valor en b	Valor a/g	Unidad
$PL_{max}$	Tamaño ináximo de paquete Ethernet	1.500	1.500	[Bytes]
$R_D$	Tasas de transmisión de datos	11, 5.5, 2 y 1	54, 48, 36, 24, 18, 12, 9 y 6	[Mbps]
$R_H$	Tasas de transmisión de encabezado	2 y 1	12	[Mbps]
$CW_{min}$	Ventana de Contienda Mínima	32	16	Ranuras
$CW_{max}$	Ventana de Contienda Máximo	1.024	1024	Ranuras
MAC	Encabezado MAC	28	28	[Bytes]
ACK	Encabezado ACK	14	14	[Bytes]
RTS	Encabezado RTS	20	20	[Bytes]
CTS	Encabezado CTS	14	14	[Bytes]
$T_{PHYL}$	Tiempo Encabezado Físico Largo	192	20	[Bytes]
$T_{PHYs}$	Tiempo Encabezado Físico Corto	96	-	[Bytes]
$T_{SIFS}$	Duración tiempo SIFS	10	10	[Bytes]
$T_{PIFS}$	Duración tiempo PIFS	50	28	[Bytes]
$\alpha$	Duración de un slot time	20	9	[Bytes]
$\delta$	Tiempo de Propagación + Procesamiento	1	1	[Bytes]

### CÁLCULO DEL THROUGHPUT

El *throughput* del sistema estará dado por la ecuación (6). En esta ecuación PL corresponde al tamaño del paquete IP, TTE y TO están definidos por las ecuaciones (3) a (5):

$$S = \frac{PL}{TTE + TO} \tag{6}$$

El escenario más simple para analizar es un enlace donde intervienen dos dispositivos, en que uno de ellos actúa como receptor, el otro como transmisor y se ajustan una serie de parámetros, tales como la ventana de contienda inicial, el tamaño de paquete, el protocolo de acceso al medio (acceso básico o RTS/CTS) y las tasas de transmisión tanto de datos como de encabezados, para obtener el máximo *throughput* del sistema. En una red operando en modo infraestructura, si el AP transmite, se habla de tráfico de bajada. En cambio, si el transmisor es

un TM de la red de infraestructura, se habla de tráfico de subida. Como resultado de que en redes inalámbricas de infraestructura un AP sirve de puente de comunicación a varios TM, el tráfico de bajada de un AP suele ser mayor o igual a la suma de los tráficos individuales de subida generados por los TM.

### Máximo Throughput con protocolo IEEE 802.11 b

Considerando las ecuaciones (3) a (6), se puede obtener el máximo *throughput*. Considerando los valores mostrados en la tabla 1 para el protocolo IEEE 802.11 b, es posible obtener una gráfica del *throughput* para el modo de acceso básico, distintos tamaños de paquete, usando como parámetro las diferentes tasas de transmisión para los datos (11 Mbps, 5,5 Mbps, 2 Mbps y 1 Mbps), con lo cual se obtiene la figura 4. En la obtención de estas curvas se han supuesto los valores de configuración por defecto de los dispositivos (los valores de la tabla 1, columna "Valor en b") y que la tasa de transmisión del nivel físico PCLP y encabezado MAC es de 1 Mbps, como operan la mayoría de los dispositivos comerciales.

De la figura 4 se observa que el mejor desempeño de la red se obtiene cuando ésta opera a la máxima tasa disponible de transmisión de datos (11 Mbps) y el deterioro que se experimenta para cada una de las tasas de transmisión de datos inferiores. Es interesante notar que en las redes inalámbricas IEEE 802.11, la presencia de interferencias severas se traduce en que se bajan adoptivamente las tasas de transmisión de datos hasta obtener resultados satisfactorios en el canal físico. El resultado de esa acción es que se disminuye considerablemente la capacidad de la red inalámbrica, como lo muestra la figura. Además, a medida que aumenta el tamaño del paquete IP, aumenta el *throughput*. El valor máximo se alcanza para paquetes de 1.500 bytes, para cualquiera de las tasas brutas admisibles.

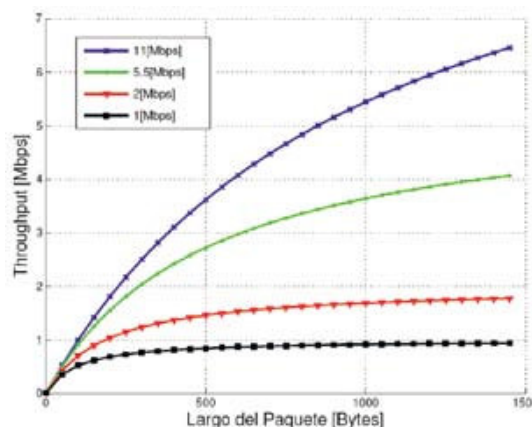


Figura 4. Throughput Acceso Básico 802.11 b.

De manera similar se determina el tiempo de transmisión exitosa para la red operando en modo RTS/CTS.

Aplicando simple aritmética se puede determinar cuál es el máximo *throughput* que podría tener una red de varios terminales, ya que esencialmente hay que dividir este valor por el número de terminales. Así, si se considera que se transmiten paquetes de 800 bytes a una tasa de red de 11 Mbps, de la figura 4 se desprende que podría tener un máximo *throughput* de 4,8 Mbps. Una red de 20 terminales tendría una tasa efectiva de 240 kbps por terminal. A pesar de que en este análisis se obvió el tiempo dedicado a resolver colisiones, es bastante exacto. En caso que se considere el efecto de las colisiones, corresponde realizar un análisis estocástico de la red, de acuerdo a las referencias [3] y [4], lo cual da lugar a que el tráfico por dispositivo es de 230 kbps, en una red también constituida por 20 dispositivos, operando en idénticas condiciones de configuración.

**Máximo Throughput con protocolo IEEE 802.11 a/g**

Si se desea analizar el comportamiento de una red operando con los protocolos IEEE 802.11 a/g, es necesario realizar un ajuste en los tamaños de los paquetes que se envían, debido a que la transmisión se realiza usando símbolos OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). En este caso se tiene que se realiza una transmisión en paralelo por 216 canales. Cada símbolo transmitido puede estar portando 1 o más bits, según sean las condiciones de enlace. Como los tamaños de los paquetes no son necesariamente divisibles por 216-b, siendo b el número de bits codificados en un símbolo transmitido, será necesario agregar bits de relleno al paquete para poder transmitirlo. La ecuación (7) permite calcular el tamaño del paquete de datos que incluye los bits de relleno.

$$L \approx \left\lceil \frac{PL [Bytes] \cdot 8 [b / Byte]}{216 [b / símbolo]} \right\rceil = N [símbolos] \tag{7}$$

$$PL_{max} = N [símbolos] \cdot 216 [b / símbolos] = M [b]$$

En la ecuación (7),  $\lceil x \rceil$  señala que ha de tomarse el valor entero superior del número x. El significado de este redondeo es que se debe agregar bits de relleno al paquete a ser enviado para poder transmitir los símbolos en paralelo. Es necesario hacer la salvedad que para el cálculo del *throughput* de la ecuación (6) será necesario considerar el tamaño del paquete a ser enviado sin bits de relleno en el numerador, mientras que para calcular el tiempo que toma enviar el paquete (ecuación (4) o (5)) será necesario usar el valor del tamaño de paquete que

entrega la ecuación (7). Para el resto de los valores se recurre a los parámetros indicados en la tabla 1 para las redes WLAN operando bajo el estándar IEEE 802.11 a/g. De esta forma se obtienen las gráficas para distintas tasas, variando el largo del paquete, tal como aparecen en la figura 5, donde se ha supuesto que la tasa de transmisión del nivel físico PCLP es de 6 Mbps.

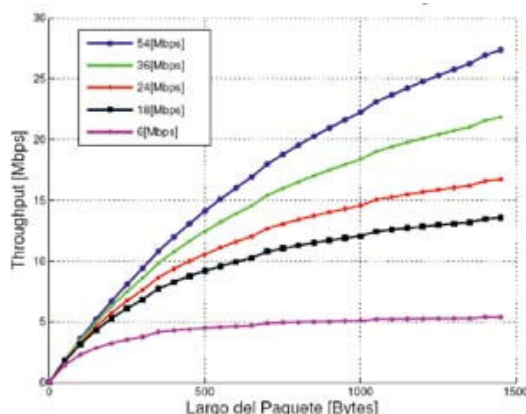


Figura 5. Throughput Acceso Básico 802.11 a/g.

**THROUGHPUT PARA REDES HETEROGÉNEAS**

Es posible extender el análisis realizado a configuraciones de red heterogéneas, que operan con tasas de transmisión de datos diferentes, para distintos terminales. La expresión (6) se modifica para incorporar la posibilidad de que m dispositivos transmitan paquetes de datos de un tamaño  $PL_m$ , usando el modo de acceso básico o RTS/CTS, una cierta tasa de transmisión y ventana de contienda inicial con un valor determinado, mientras otros n dispositivos tienen estos parámetros configurados de otra forma; ecuación (8):

$$S = \frac{m \cdot PL_m + n \cdot PL_n}{(m \cdot TTE_m + m \cdot TO_m) + (n \cdot TTE_n + n \cdot TO_n)} \tag{8}$$

Los términos utilizados en la ecuación (8) son los definidos por las ecuaciones (3) a (7) inclusive, con los parámetros mencionados en la tabla 1. Esto abre el análisis para un sinnúmero de posibles situaciones. Por limitaciones de espacio, en esta publicación se limitará el estudio a dos casos particulares, que resultan ser interesantes. Para el análisis se considera que todos los parámetros de los dispositivos de la red se ajustan a sus valores por defecto, excepto aquellos cuyo efecto se desea estudiar respecto del desempeño de la red. Sin embargo, el procedimiento seguido aquí se puede extender para otras configuraciones paramétricas susceptibles de analizar.

### Igualdad en el acceso, distintas tasas de transmisión

Se considerará la degradación del *throughput* frente a variaciones en las tasas de transmisión. Se supondrá que hay en total 10 dispositivos ( $n + m = 10$ ), que el tamaño de los paquetes es de 1.500 bytes, que la  $CW_{min} = 32$  y se analiza el hecho de que un número  $n = [0,10]$  de dispositivos reducen su tasa de transmisión a 5,5; 2 y 1 Mbps. Con estas consideraciones la ecuación (8) se reduce a la ecuación (9).

$$S = \frac{10 \cdot PL}{(10 - n) \cdot TTE_m + n \cdot TTE_n + 10 \cdot TO} \quad (9)$$

En la figura 6 se presenta el resultado de reducir la tasa transmisión en los  $n$  dispositivos a 5,5, 2 o 1 Mbps, mientras que la tasa más elevada de los  $(10-n)$  dispositivos es de 11 Mbps, en una red operando con el estándar IEEE 802.11b. Así, por ejemplo, cuando hay 3 dispositivos transmitiendo a 2 Mbps, mientras que 7 dispositivos transmiten a 11 Mbps, la tasa efectiva total es de aproximadamente 3,6 Mbps (curva roja). Esto se traduce que el *throughput* por dispositivo, en promedio, bajo estas condiciones, en estado de saturación de la red, es de 360 kbps. En la medida que más terminales transmiten a tasa más baja, mayor es la degradación. Por ejemplo, si  $n=10$  terminales transmiten a 2 Mbps, el *throughput* se deteriora a 1,88 Mbps.

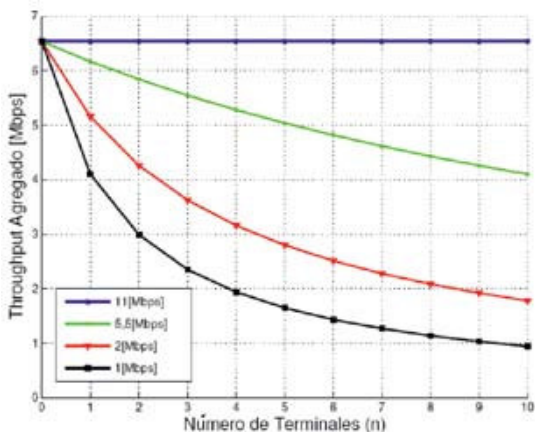


Figura 6. Throughput de red IEEE 802.11b operando con  $(10-n)$  dispositivos a tasa 11 Mbps y  $n$  a tasa inferior.

Una consecuencia interesante que se puede extraer de los resultados de la figura 6 es que la configuración por defecto de los dispositivos inalámbricos se transmite a tasa adaptiva. En general se tendrá que el encabezado del nivel físico y de la capa MAC se transmitirá a la tasa más alta que puede soportar un dispositivo de la red

que se encuentra en las condiciones más desfavorables de enlace. Es decir, un dispositivo que se encuentra con un enlace muy malo, transmitirá a la tasa más baja para disminuir la probabilidad de error, obligando a los demás dispositivos de esta red a usar esa tasa. En consecuencia, el hecho que un terminal de una red inalámbrica presente condiciones de elevada interferencia tiene un impacto sobre toda la red, dado que todos los terminales deben bajar sus tasas de transmisión. Así, en un caso extremo, el deterioro puede ser que se pase de un *throughput* agregado de 6,5 Mbps para los 10 dispositivos a uno de 1 Mbps, lo que se traduce en una reducción de 6,5 veces de la capacidad de la red.

Nótese que los resultados de la figura 6 son solamente ilustrativos acerca de las posibilidades de análisis que se dispone con el conjunto de ecuaciones desarrollado. Es posible extender el análisis a un número superior de terminales. Del mismo modo, es posible evaluar con los datos de RTS/CTS y obtener curvas similares a las presentadas en la figura 6.

### EFFECTOS DEL TRÁFICO MIXTO

En esta sección se analizará la influencia que produce en el rendimiento global de la red el tráfico mixto, es decir, hay  $m=d$  dispositivos que transmiten paquetes de datos de tamaño  $PL_m = 1.500$  bytes, mientras  $n=v$  transmiten paquetes de voz de tamaño  $PL_n = 50$  bytes, según lo describe la ecuación (8). El tamaño del paquete de voz se calcula para codecs G.729A. Con G.729A, el tamaño del paquete de VoIP emitido cada 10 ms es de  $(20(IPv4) + 8(UDP) + 12(RTP) + 10(G.729)) = 50$  bytes, [5]. Esto equivale a una tasa de 40 kbps por terminal de voz. Nuevamente se supondrá que  $n+m = 10$ , incrementado el valor de  $n$  en el rango  $[0,10]$ . Se analizará adicionalmente el efecto sobre el rendimiento global de la red al disminuir el tamaño de la ventana de contienda inicial  $CW_{min}$  en los TM de VoIP. Los demás parámetros de la red se mantienen en los valores por defecto del protocolo. Un valor menor de la ventana de contienda inicial se traduce en una espera menor para realizar la transmisión y, en caso de experimentar colisiones en la transmisión, lograr un acceso más frecuente al canal compartido. Esto debería reducir el retardo que experimentan los paquetes de voz, como asimismo reducir las variaciones de retardo (*jitter*).

#### Tráfico mixto de voz y datos para IEEE 802.11 b

Los resultados de evaluar la ecuación (8) con los parámetros establecidos se evidencian en la figura 7, donde se diferencia el *throughput* total del tráfico de subida y bajada.

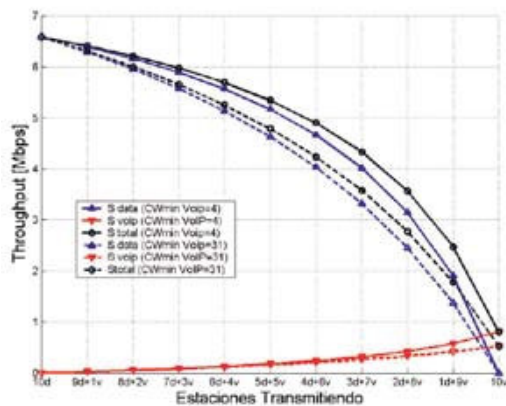


Figura 7. Efecto de  $CW_{min}$  y número de terminales de Voz, Datos y Total en el throughput de IEEE 802.11b.

El efecto de tener más terminales de voz en la red es que en la medida que aumenta el número de éstos disminuye el *throughput* total. También se tiene que el *throughput* total de la red es superior cuando se configura a los terminales de voz con  $CW_{min} = 4$  que cuando se usa el valor por defecto,  $CW_{min} = 32$ . Es decir, no sólo se obtendrán beneficios en la disminución de los retardos y de la variación de los retardos al disminuir el valor de  $CW_{min}$  de los terminales de voz, sino que también aumentará el *throughput*. Esto se ve reflejado en la recomendación de CISCO para fijar  $CW_{min}$  en un valor inferior para paquetes marcados de voz que para los datos en redes de tipo infraestructura [6].

Nótese, además, que no tiene mucho sentido realizar un análisis con más de 10 terminales de voz, dado que el *throughput*, cuando sólo se tiene terminales de voz con  $CW_{min} = 32$  es de 600 kbps, lo cual significa que por terminal se tiene disponible solamente 60 kbps, que es ligeramente superior a los 40 kbps que requiere el codec G.729. Esto se confirma mediante los resultados experimentales publicados en [7] y [8], donde se demuestra que en redes experimentales IEEE 802.11 b no es posible soportar un número mayor de 7 conversaciones de VoIP utilizando un codec G.729 de 10 ms de procesamiento de paquetes de voz. Es de destacar que este último resultado es de carácter experimental, mientras que el dato obtenido de la figura 7 es derivado de un modelo determinístico que asume que no se producen colisiones en el canal compartido y no hay interferencias. Esto último pone de manifiesto que el modelo, aun siendo optimista, permite extraer información útil.

Se ha considerado un tamaño arbitrario de  $PL_m = 1.500$  bytes de los paquetes de datos para derivar los resultados mostrados en la figura 7. En caso de que se desee realizar el análisis para otra condición, basta con considerar  $PL_m = \langle \text{otro número de} \rangle$  bytes. La idea es ilustrar que se puede trabajar con las expresiones presentadas en el trabajo para obtener los resultados que mejor se atengan a la aplicación que se desea considerar. En este caso se escogió precisamente  $PL_m = 1.500$  bytes, con el propósito de poder establecer comparaciones entre las figuras de esta publicación.

### Tráfico mixto de voz y datos en IEEE 802.11 b/g

En este análisis se agrega al hecho de tener paquetes de diferente tamaño para voz y datos, el hecho de que los valores de las tasas de transmisión y  $CW_{min}$  son diferentes para los estándares IEEE 802.11 b y g. Nuevamente se evalúa la ecuación (8), considerando que los datos se transmiten usando la máxima tasa del IEEE 802.11 g, mientras que la voz se transmite a la máxima tasa del estándar IEEE 802.11 b. Esto se compara con una transmisión de datos y voz a la tasa máxima de IEEE 802.11 b e IEEE 802.11 g, respectivamente, compartiéndose la tasa de transmisión de los encabezados, a 1 [Mbps]. Lo último es una condición necesaria en una red mixta IEEE 802.11 b/g, ya que todos los dispositivos deben ser capaces de descifrar la información contenida en los encabezados. El resultado se muestra en la figura 8, donde se observa que las estaciones de datos se ven fuertemente castigadas en su capacidad por el hecho de que tienen que transmitir el encabezado a tasas obligadas por la presencia de los terminales de voz. (Compárese figura 8 con figura 5).

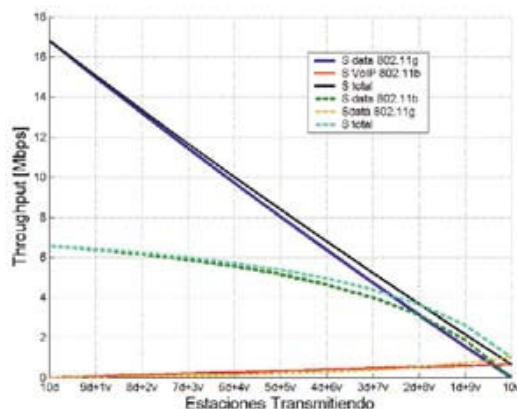


Figura 8. Tráfico mixto IEEE 802.11 b/g coexistiendo en celda.

## CONCLUSIONES

El aspecto relevante de este trabajo es que permite obtener las cotas máximas del *throughput* para redes operando con los estándares IEEE 802.11 a/b/g, mediante relaciones sencillas derivadas de un análisis que obvia las dificultades asociadas a la interferencia electromagnética y a las colisiones propias de esta familia de protocolos. El trabajo fue realizado en un marco de trabajo similar al de las publicaciones que analizan el desempeño de este tipo de redes desde el punto de vista de la capa MAC, donde se supone un canal exento de interferencias. La mayoría de las publicaciones que analizan el desempeño de la capa MAC de las redes IEEE 802.11 consideran el canal libre de errores de transmisión. Sólo unas pocas analizan la interacción de la capa física con la de la capa MAC. En la práctica, cuando la tasa de errores es muy elevada, este tipo de redes corrigen este fenómeno adaptando las tasas de transmisión (bajando la tasa en la medida que se registra un mayor grado de interferencia, para obtener tasas de error en la recepción de los bits menores). De esta forma, el canal físico afecta el desempeño de estas redes con una baja en el desempeño, como lo ilustra la figura 4. Varios ejemplos desarrollados en esta publicación ilustran que los administradores de redes inalámbricas puedan configurar los parámetros de los dispositivos, con el fin de obtener los mejores desempeños, usando el análisis propuesto.

El análisis no considera el efecto de las colisiones e interferencias electromagnéticas y por eso resulta ser optimista. Sin embargo, si se analiza el *throughput* global de la red inalámbrica, el resultado de este análisis es bastante cercano al que resulta de un análisis estocástico. El efecto de no incluir la posibilidad de que un mensaje tenga que ser retransmitido por haber colisionado tiene por consecuencia de que no es posible conocer cuál es el comportamiento que experimenta el tráfico de subida y el de bajada cuando está congestionada, debido a que las expresiones desarrolladas no permiten representar adecuadamente el funcionamiento del algoritmo de *backoff* exponencial en presencia de colisiones. En particular, el análisis desarrollado es sensible, en menor escala a  $CW_{min}$ , pero no considera el número de retransmisiones ni el valor de  $CW_{max}$ . La consecuencia es que puede ocurrir un *throughput* menor al obtenido mediante este análisis, por estrangulamiento del tráfico de subida o el de bajada. También ocurre que el modelo no permite evidenciar la ventaja comparativa de utilizar el protocolo RTS/CTS, cuando los paquetes son de tamaño mayor (sobre 600 bytes) y se está en presencia del fenómeno del terminal oculto.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer las observaciones realizadas por los pares evaluadores anónimos, pues han contribuido a mejorar sustancialmente la publicación.

## REFERENCIAS

- [1] IEEE. International Standard 802.11. "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications". The Institute of Electrical and Electronics Engineers. Inc. 1999.
- [2] S. Delgadillo, D. Guzmán, A. Mueller y W. Grote. "Análisis experimental de un ambiente WiFi Multicelda". Revista de la Facultad de Ingeniería – Universidad de Tarapacá. Vol. 13 N° 3, pp. 45-52. 2005.
- [3] G. Bianchi. "Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function". IEEE JSAC. Vol. 18 N° 3, pp. 535-547. March, 2000.
- [4] H. Wu, Y. Peng, K. Long and S. Cheng. "A Simple Model of IEEE 802.11 Wireless LAN". Proc. IEEE International Conferences on Info-Tech and Info-net (ICII). Beijing. Vol. 2, pp. 514-519. October, 2001.
- [5] Cisco Systems Inc. "Understanding Codecs: Complexity, Hardware Support, MOS, and Negotiation", pp. 2-4. February 2005. Date of Visit: 6/23/2006. URLs: [http://www.cisco.com/warp/public/788/voip/codec\\_complexity.html#mos](http://www.cisco.com/warp/public/788/voip/codec_complexity.html#mos)
- [6] Cisco Systems Inc. "Wireless Quality-of-Service Deployment Guide", pp. 7. 2003. Date of Visit: 6/23/2006. URLs: [http://www.cisco.com/warp/public/cc/pd/witc/ao1200ap/prodlit/qosdg\\_an.pdf](http://www.cisco.com/warp/public/cc/pd/witc/ao1200ap/prodlit/qosdg_an.pdf)
- [7] S. Garg and M. Kappes. "An experimental study of throughput for UDP and VoIP traffic in IEEE 802.11b networks". Proc. IEEE WCNC. Vol. 3, pp. 1748-1753. March, 2003.
- [8] S. Garg and M. Kappes. "Can I add a VoIP call?". Proc. IEEE ICC, vol. 2, pp. 779-783. May, 2003.