



Biblioteca Universitaria

La consulta de este documento, que se lleva a cabo mediante claves de identificación y responsabilidad personal, es posible exclusivamente para fines de estudio personal o investigación. No se autoriza a reproducir su texto más que en forma de breves citas entrecomilladas, indicando el nombre del autor y la fuente. Por tanto, no se permite descargar, copiar, transformar ni grabar su contenido.

Índice

Índice	i
Capítulo 1 Introducción	1
1.1.- Introducción	1
1.2.- Motivaciones y objetivos	2
1.3.- Introducción a las redes inalámbricas	3
1.4.- Estructura del proyecto.....	3
Capítulo 2 Redes inalámbricas	5
2.1.- Introducción	5
2.2.- Estándar IEEE 802.11	8
2.3.- Arquitectura de la red inalámbrica	10
2.4.- Capas IEEE 802.11	11
2.5.- Modulación OFDM	16
2.6.- Interferencias	17
2.7.- Nodo oculto	19
Capítulo 3 Sistema de medida	22
3.1.- Introducción	22
3.2.- Banco de medida	23
3.3.- Software	27
3.3.1. 3.3.1 Chariot 5.0	27
3.3.2. 3.3.2 Iperf – Jperf 2.0.2	28
3.4.- Método de medida	29
Capítulo 4 Caracterización experimental	32
4.1.- Introducción	32
4.2.- Throughput bruto vs throughput neto	33
4.3.- Degradación por CSMA/CA	34
4.4.- Degradación por interferencia co-canal	35
4.4.1. 4.4.1.- Influencia de la SIR	35
4.4.2. 4.4.2.- Influencia de la SIR sobre data rates fijas.....	36
4.4.3. 4.4.3 Influencia del grado de ocupación de canal	39

4.4.4. 4.4.4.- Influencia del data rate de la señal interferente.....	40
4.5.- Medidas canal adyacente.....	41
4.5.1. 4.5.1 Influencia de la SIR.....	41
4.5.2. 4.5.2 Influencia del grado de ocupación del canal	43
Capítulo 5 Conclusiones y líneas futuras	45
5.1.- Conclusiones	45
5.2.- Líneas futuras	46
Acrónimos	48
Anexo	50
Bibliografía:.....	55

Capítulo 1 Introducción

1.1.- Introducción

Tras algo más de una década, las redes inalámbricas se han convertido en algo indispensable en la sociedad actual, creciendo exponencialmente en los últimos años. Hoy en día disponemos de multitud de elementos con conexiones inalámbricas que utilizamos constantemente: Ordenadores, smartphones, tablets, gps, videoconsolas, reproductores de video y audio, electrodomésticos, etc.

Los entornos inalámbricos permiten desarrollar soluciones más económicas y de forma más rápida que las conexiones cableadas, ya que su instalación no requiere en general de obras o grandes reformas.

Este aumento de conexiones ha generado un incremento de las interferencias, lo que sumado al limitado ancho de banda disponible no hacen sencillo el diseño y la planificación radioeléctrica de un sistema inalámbrico. El estudio del efecto de dichas interferencias promueve este proyecto.

En las redes tradicionales cableadas esta información viaja a través de cables coaxiales, pares trenzados o fibra óptica. Una red de área local inalámbrica, es un sistema flexible

de comunicaciones que puede implementarse como una extensión o directamente como una alternativa a una red cableada. Este tipo de redes utiliza tecnología de radiofrecuencia minimizando así la necesidad de conexiones cableadas. Este hecho proporciona al usuario una gran movilidad sin perder conectividad.

El atractivo fundamental de este tipo de redes es la facilidad de instalación y el ahorro que supone la supresión del medio de transmisión cableado. Aún así, debido a que sus prestaciones son menores en la velocidad de transmisión, las redes inalámbricas son la alternativa ideal para hacer llegar una red tradicional a lugares donde el cableado no lo permite, y en general se utilizan como un complemento de las redes fijas.

Conceptualmente no existe ninguna diferencia entre una red cableada y una inalámbrica, a excepción de la flexibilidad de esta última, debido a la eliminación de los cables para establecer una conexión.

1.2.- Motivaciones y objetivos

Las redes inalámbricas ofrecen facilidades respecto a las redes cableadas y además permiten al usuario moverse dentro de un entorno manteniendo la conectividad, si bien tienen el problema de sufrir interferencias lo que puede reducir dramáticamente su calidad de comunicación.

A la hora de incorporar una red de área local inalámbrica, es preciso haber realizado una correcta planificación de los puntos de acceso necesarios para asegurar la cobertura en las zonas de interés, la capacidad en función del tráfico con que se va a trabajar, y mantener una correcta relación entre la señal y las diversas interferencias en cada punto.

La motivación de este proyecto surge bajo la necesidad de evaluar, cuantificar y documentar el efecto de las interferencias sobre las redes inalámbricas, concretamente las basadas en el estándar IEEE 802.11g. De este modo se puede tener una mejor visión para planificar adecuadamente redes en lugares que sufran altos niveles de interferencias.

El objetivo del proyecto es analizar el efecto de las interferencias sobre una red IEEE 802.11g en diversas situaciones, profundizando en el estudio con una amplia campaña de medidas. El estudio se basará en obtener el *throughput* (velocidad del régimen binario) del sistema en función de la SIR (relación entre las potencias de las señales

referente e interferente), el grado de ocupación del medio, el *data rate* (velocidad de transferencia de datos), y otra serie de factores que se han considerado interesantes.

Para lograrlo, se diseña y construye un banco de medidas concreto, donde se controla la red en estudio respecto a posibles interferencias presentes en el entorno.

1.3.- Introducción a las redes inalámbricas

Una red inalámbrica queda definida como un sistema entre dos o más dispositivos que no utilizan cables para comunicarse. Actualmente existe gran variedad de tecnologías que se utilizan para crear redes inalámbricas: desde los infrarrojos y radiofrecuencia para comunicar dispositivos situados a cortas distancias, hasta las grandes redes globales que transmitan voz y datos a lo largo de grandes regiones geográficas.

Las redes inalámbricas se componen fundamentalmente de dos tipos de elementos, los puntos de acceso (AP), y los clientes, pero como se verá en el próximo capítulo no todos los tipos de redes inalámbricas hacen uso de los puntos de acceso. Los puntos de acceso son dispositivos que permiten que varios clientes se comuniquen entre sí de forma inalámbrica. Dado que los puntos de acceso cubren un área limitada, se utilizan varios puntos de acceso para cubrir áreas más amplias. Los puntos de acceso están formados por una interfaz radio y por una interfaz cableada que permite que el tráfico de la red inalámbrica pase a la red cableada o viceversa.

En el capítulo 2 se profundizará en el funcionamiento de las redes inalámbricas, concretamente en las basadas en el estándar IEEE 802.11.

1.4.- Estructura del proyecto

La memoria de este proyecto está dividida en cinco capítulos, donde se recoge todo el trabajo realizado, tanto a nivel teórico como práctico.

En el primer capítulo se explica el contexto en el que nos encontramos justificando las motivaciones del proyecto, así como sus objetivos. También se describen brevemente las redes inalámbricas así como sus principales características.

En el segundo capítulo se detallan las diferentes redes inalámbricas que nos podemos encontrar, para posteriormente profundizar en el estándar IEEE 802.11g, sobre el cual se centra este proyecto. Se explicará su funcionamiento a niveles básicos para entender correctamente como funciona la comunicación dentro de la red inalámbrica, además de exponer como afectan las interferencias a una red inalámbrica.

En el tercer capítulo se recoge el sistema de medida utilizado durante el proyecto. Se describe el banco de trabajo diseñado, así como el software utilizado para obtener los resultados de las medidas. En esta parte, queda detallado el método de medida que ha sido utilizado.

El cuarto capítulo es la parte central del proyecto, donde se recogen todos los datos obtenidos para su análisis. Se realiza una exposición del efecto de las interferencias sobre una red inalámbrica basado en el IEEE 802.11g, tanto en modo cocanal como canal adyacente.

En el quinto y último capítulo se encuentran las conclusiones finales del proyecto, así como se proponen líneas futuras de investigación relativas al efecto de interferencias sobre redes IEEE 802.11.

Capítulo 2 Redes inalámbricas

2.1.- Introducción

En el presente capítulo se evaluará el estándar 802.11 a través de sus especificaciones sobre la capa física y la capa de enlace, profundizando en los mecanismos y protocolos determinados por la capa MAC, la cual controla el acceso al medio. El estudio de esta subcapa resulta importante para entender las comunicaciones en una red inalámbrica.

Comenzaremos hablando de las redes inalámbricas y sus principales características:

- **Movilidad:** Las redes inalámbricas ofrecen acceso a la red local desde cualquier sitio dentro de su radio de cobertura, incluso encontrándose en movimiento.
- **Fácil instalación:** Más rapidez y simplicidad frente a la extensión de cables por una zona determinada.
- **Flexibilidad:** Dado que es posible disponer de cobertura de red en entornos de difícil acceso, incorporando redes en lugares donde no se pueda extender cable.

- Adaptabilidad: Tolera frecuentes cambios de la topología de la red, y facilita la ampliación de la red a nuevos usuarios, sin la necesidad de extender un nuevo cable. Permite organizar redes en sitios cambiantes o situaciones no estables como pudieran ser: congresos, sedes temporales, etc.

Las redes inalámbricas pueden dividirse en cuatro grandes categorías, tomando como criterio de clasificación la cobertura que puedan alcanzar:

Redes inalámbricas de área personal o WPAN (*Wireless Personal Area Network*).

Son aquellas que cubren distancias cortas. Debido a su poca cobertura, estas redes se utilizan para interconectar dispositivos que se encuentran muy próximos entre sí. Su objetivo principal es eliminar el cableado en los dispositivos personales de uso más común ofreciendo así una mayor versatilidad. Algunas tecnologías dentro de este tipo de redes son: bluetooth, DECT (*Digital Enhanced Cordless Telecommunications*) y los infrarrojos.

Redes inalámbricas de área local o WLAN (*Wireless Local Area Network*).

Pueden tener un alcance de centenares de metros. Durante muchos años, este tipo de redes inalámbricas fueron creadas empleando tecnologías incompatibles entre sí. Sin embargo, con el paso del tiempo el sistema wifi ha impuesto su dominio en el mercado unificando este tipo de comunicación. La tecnología wifi, hasta hace poco desconocida, tiene en la actualidad una gran cantidad de aplicaciones. No obstante, aunque el wifi es la más utilizada hay que nombrar también redes como: homeRF (*Home Radio Frequency*) e hiperLAN (*High Performance Radio LAN*).

Redes inalámbricas de área metropolitana o WMAN (*Wireless Metropolitan Area Network*).

Se utilizan para establecer comunicación entre diferentes ubicaciones dentro de una región metropolitana. Las tecnologías más utilizadas de este tipo son LMDS (*Local Multipoint Distribution Service*) y WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*).

Redes inalámbricas globales o WAN (*Wireless Wide Area Network*).

Son los sistemas basados en telefonía móvil y pueden cubrir todo un país. Los primeros sistemas fueron analógicos y más tarde aparecieron los sistemas digitales para

transmisión de datos, como es el caso de la tecnología europea GSM (*Group Special Mobile*) o la norteamericana CDMA(*Code División Multiple Access*).Las tecnologías WMAN se conocen también como sistemas de segunda generación (2G), o los actuales sistemas de tercera generación (3G).

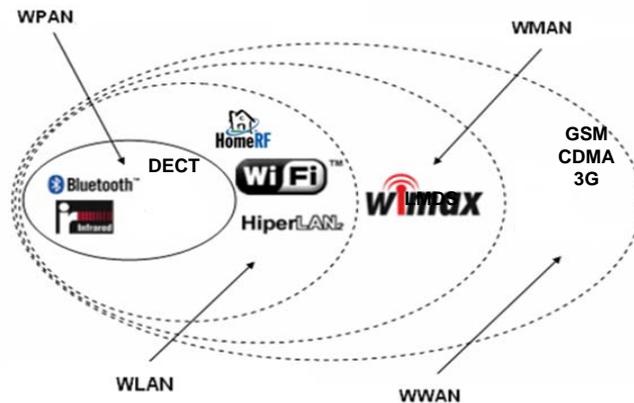


Figura 2.1 Clasificación de las redes inalámbricas según su cobertura

Wi-Fi Alliance (anteriormente WECA, *Wireless Ethernet Compability Aliance*) es una organización internacional, sin ánimo de lucro, formada en 1999 para certificar la interoperabilidad de los productos inalámbricos de redes de área local basados en la especificación del IEEE 802.11. Los productos que pasan el este proceso reciben la certificación Wi-Fi® (figura 2.1b).



Figura 2.1b Certificación Wi-Fi, indica la compatibilidad bajo los estándares 802.11a/b/g/n

Cuando se habla de wifi se hace referencia a una de las tecnologías de comunicación inalámbricas mediante ondas más utilizada hoy en día. Esta tecnología también se denominada WLAN (*wireless LAN*), red inalámbrica o estándar IEEE 802.11. No siendo en ningún caso una abreviatura de *Wireless Fidelity*, sino que su nomenclatura simplemente es un nombre comercial.

2.2.- Estándar IEEE 802.11

El IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) aprobó la norma 802 en 1990, que normalizaba el comportamiento de las redes de área local y metropolitanas. Se definía un estándar necesario para que los productos de los diferentes fabricantes del mercado fueran compatibles entre sí. Esta primera norma se fue dividiendo sucesivamente en diferentes grupos de trabajo, y en la actualidad existen ya más de veinte. En Figura 2.2 se pueden observar los 15 primeros grupos de trabajo.

Grupos de trabajo	Características
802.1	Protocolos superiores de redes de área local
802.2	Control lógico del enlace
802.3	Ethernet
802.4	Token Bus
802.5	Token Ring
802.6	Red de Área Metropolitana
802.7	Grupo de Asesoría Técnica sobre banda ancha
802.8	Grupo de Asesoría Técnica sobre fibra óptica
802.9	Redes de área local isosíncronas
	Seguridad interoperable en redes de área local
802.10	isosíncronas
802.11	Red local inalámbrica (wifi)
802.12	Prioridad de demanda
802.13	No se usa
802.14	Cable módems
802.15	Red de área personal inalámbrica (Bluetooth)
802.16	Red metropolitana inalámbrica (WiMAX)

Figura 2.2 Grupos de trabajos de la normativa IEEE 802

Dentro del grupo de trabajo IEEE 802.11 se pueden encontrar diferentes versiones, siendo las más destacadas:

IEEE 802.11:

Este fue el primero de los estándares definidos por la IEEE para aplicaciones WLAN, fue publicado en 1997. Funciona sobre la banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) de 2,4 GHz (de 2400 MHz a 2483,5 MHz) y utiliza dos tipos de modulación: DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*) y FHSS (*Frequency Hopped Spread*

Spectrum). La velocidad de transmisión que es capaz de alcanzar está entre 1 o 2 Mbps. Este estándar está prácticamente en desuso, debido a la aparición de una serie de variantes que mejoran no sólo la velocidad de transferencia, sino que además dan cobertura a funciones especiales de seguridad.

IEEE 802.11a:

Este estándar fue ratificado en 1999 y presenta, como diferencia fundamental, su funcionamiento sobre la banda de frecuencia de 5 GHz (5150 MHz a 5350 MHz y de 5470 MHz a 5725 MHz), utilizando la técnica de modulación OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Esta técnica permite dividir la portadora de datos en 52 subportadoras de menor velocidad que se transmiten en paralelo, consiguiendo así velocidades brutas de transmisión hasta 54 Mbps.

IEEE 802.11b:

Se diferencia del IEEE 802.11 en el uso exclusivo de la modulación DSSS con el sistema de codificación CCK (*Complementary Code Keying*). Igual que el 802.11a fue ratificado en 1999. Esto le permite ofrecer hasta 11 Mbps de velocidad bruta. Las velocidades de transmisión que es capaz de ofrecer podrán variar desde 1, 2, 5,5 y 11 Mbps, dependiendo de diferentes factores. Esta característica, denominada DRS (*Dynamic Rate Shifting*), permite a los adaptadores de red inalámbricos reducir las velocidades para compensar los posibles problemas de recepción que se pueden generar por las distancias o las interferencias.

IEEE 802.11g:

A mediados del año 2003 se aprobó un nuevo estándar, el 802.11g, que se basa en la norma 802.11b. Más avanzada que su predecesora, trabaja en sobre la misma frecuencia de los 2,4 GHz y es capaz de utilizar dos métodos de modulación (DSSS y OFDM), lo que la hace compatible con el estándar b. Al soportar ambas codificaciones, este nuevo estándar será capaz de incrementar notablemente la velocidad de transmisión, pudiendo llegar hasta los 54 Mbps brutos como 802.11a, aunque manteniendo las características propias del 802.11b en cuanto a distancia, niveles de consumo y frecuencia utilizada. Es la pieza central de nuestro proyecto.

IEEE 802.11n:

Es la versión más reciente del estándar, actualmente en el draft 2.0. Este futuro estándar será compatible con las normas 802.11a/b/g y permitirá alcanzar velocidades de

transmisión brutas de 300 Mbps con el uso de las tecnologías MIMO (*Multiple Input-Multiple Output*) y *Channel Bonding*. La tecnología MIMO utiliza el multiplexado espacial, para transmitir múltiples flujos de datos independientes consiguiendo multiplicar las transmisiones. El *Channel Bonding* es una segunda tecnología incorporada al estándar 802.11n, la cual puede utilizar dos canales separados, que no se solapen, para doblar el ancho de banda y así duplicar la velocidad.

2.3.- Arquitectura de la red inalámbrica

Las redes WLAN se pueden reducir principalmente a dos tipos de elementos: los puntos de acceso (AP) y los clientes. Los puntos de acceso funcionan de forma equivalente a los concentradores de la red cableada, permitiendo que varios clientes inalámbricos se comuniquen entre sí. Las WLAN pueden tener diferentes configuraciones o arquitecturas que determinan la forma en que los puntos de acceso y los clientes trabajan en red:

- IBSS (*Independent Basic Service Set*): Esta modalidad permite exclusivamente comunicaciones directas entre los distintos terminales que forman la red. Son comunicaciones entre dos o más terminales del grupo no existiendo ningún terminal principal (AP) que coordine al grupo. Esta modalidad también es conocida como Ad-Hoc.

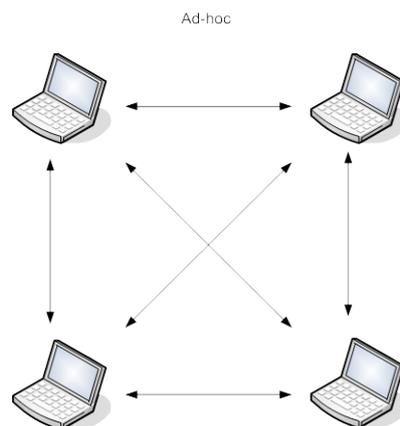


Figura 2.2 Modo Ad-Hoc

- BSS (*Basic Service Set*): Conocida como modo infraestructura. En este caso existe un único punto de acceso que realiza las funciones de coordinación centralizada de la comunicación entre los distintos terminales de la red. El punto de acceso hace las funciones de *buffer* y de *gateway* con otras redes.

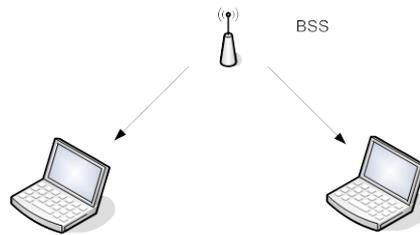


Figura 2.3 Modo infraestructura

- ESS (*Extended Service Set*): Modalidad que permite crear una red inalámbrica formada por más de un punto de acceso. De esta manera se puede extender el área de cobertura de la red, quedando construida por un conjunto de celdas. Una red ESS está formada por múltiples redes BSS.

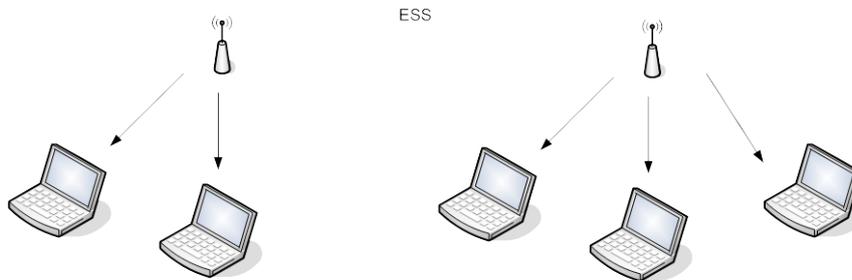


Figura 2.4 Red ESS formada por dos BSS

2.4.- Capas IEEE 802.11

La estándar 802.11 sigue el mismo modelo o arquitectura de toda la familia 802, es decir, especifica la capa física y la subcapa MAC de la capa de enlace [2]. En la capa física se distinguen dos subcapas: la inferior, llamada PMD (*Physical Media Dependent*), corresponde al conjunto de especificaciones de cada uno de los sistemas de transmisión a nivel físico y la superior PLCP (*Physical Layer Convergence Procedure*) que se encarga de homogeneizar las diversas especificaciones de la subcapa PMD.

En la subcapa MAC se especifica el protocolo de acceso al medio propiamente dicho, así como una serie de características propias de las redes inalámbricas como son: el envío de acuses de recibo (*ACK, Acknowledgement*) con cada trama de datos o la posibilidad de realizar fragmentación de las tramas.

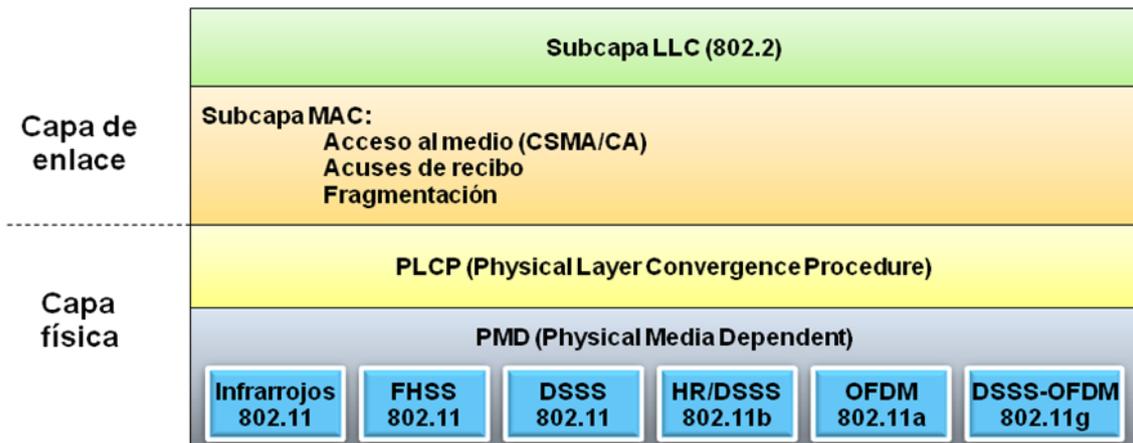


Figura 2.5 Modelo 802.11

Nivel o capa de enlace:

El nivel de enlace o DLL (*Data Link Layer*) proporciona las funciones y los procedimientos necesarios para la transferencia de datos, además de detectar y corregir los posibles errores que puedan generarse en la capa física. Para lograr estos objetivos la capa se divide en dos subcapas: la subcapa LLC (*Logical Link Control*) y la subcapa MAC (*Medium Access Control*).

Subcapa LLC:

La subcapa LLC define el formato en que los datos son transferidos sobre el nivel físico, dando servicio a las capas superiores. Esta subcapa maneja el control de flujo y errores, así como el entramado y direccionamiento de la subcapa MAC.

El estándar 802.11 no especifica la subcapa LCC, sin embargo, se utiliza una extensión del estándar LLC 802.2 (SNAP, *SubNetwork Access Protocol*) para la encapsulación de los niveles superiores, con el fin de asegurar la compatibilidad con otras redes de área local.

Subcapa MAC:

La subcapa MAC es la encargada de administrar el control de acceso al medio físico de red. También añade la dirección MAC del nodo fuente y del nodo destino en cada trama transmitida. Ésta capa define los mecanismos que permiten a las estaciones negociar el acceso al medio físico, así como los que aseguran la entrega de datos. Se presentan dos

tipos de funciones para coordinar la transferencia de datos: DCF (*Distributed Coordination Function*) y PCF (*Point Coordination Function*):

DCF:

Se trata del modo básico y es utilizado para datos que no son sensibles al retardo, permitiendo la interacción de múltiples estaciones sin un control centralizado. Es posible utilizarlo en modo infraestructura y en modo *ad-hoc*. La capa MAC hace uso del protocolo CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance*) en vez del CSMA/CD (*Carrier Sense Multiple Avoidance/Collision Detection*). Hay que tener en cuenta que en un medio cableado una estación puede emitir y recibir al mismo tiempo, mientras que en un medio inalámbrico la comunicación es *half duplex*. En éste antes de transmitir debe comprobarse que el canal no está ocupado para evitar la colisión de tramas, retrasando el envío si fuese necesario. El funcionamiento detallado se describe a continuación:

1. Escucha de la portadora que determina si el medio está libre u ocupado. En 802.11 existen dos tipos de funciones para la escucha del medio, una física (*physical carrier-sensing*) y otra virtual (*virtual carrier-sensing*). La primera se realiza por la capa física, depende del medio y de la modulación utilizada. La detección de portadora es controlada por un umbral aplicado al nivel de la señal percibida. Éste se debe seleccionar adecuadamente, debido a que umbrales bajos tienden a ser sensibles a muchos factores, como por ejemplo, el nivel de ruido térmico del medio. Además, se pueden desencadenar falsas indicaciones, que producirían una reducción del rendimiento en las transmisiones.

La escucha virtual es responsabilidad del NAV (*Network Allocation Vector*). Las tramas 802.11 disponen de un campo donde el emisor indica cuantos microsegundos estará el medio ocupado para transmitir la trama (el tiempo estimado también incluye la respuesta ACK). El NAV es un temporizador que determina el tiempo que el medio estará reservado para la transmisión. La estación emisora activa el NAV al estimar la duración de la transmisión en curso y el resto de las estaciones que “escuchan” la trama inician el contador que comienza en el valor que indica el NAV. Mientras el NAV > 0 el medio estará ocupado y ninguna estación transmitirá hasta que sea 0.

2. Detección y recuperación de errores. Cuando se detecta un error en la transmisión al no llegar la confirmación de la trama, esta es reenviada. Aunque el número máximo de retransmisiones está definido por el estándar, cada fabricante puede seleccionar el valor de manera oportuna. IEEE 802.11 define dos tipos de retransmisiones: *long retry limit* y

short retry limit; el primero se utiliza para tramas de datos de longitud superior al umbral RTS (*Request to Send*) y el segundo para tramas con longitudes inferiores. Si la estación que transmite la trama no recibe el reconocimiento ACK se incrementa el contador de transmisiones hasta el valor máximo, 4 intentos en *long retry limit* y 6 *short retry limit* según el estándar. El contador vuelve a 0 cuando se recibe una trama CTS (*Clear to Send*) en respuesta a una RTS o cuando se recibe el reconocimiento a la trama de datos. La transmisión de datos es una operación atómica, la secuencia envío de datos-ACK debe completarse de manera correcta si se quiere evitar una retransmisión.

3. Monitorización del medio antes de transmitir. Con anterioridad a emitir la estación monitoriza el medio durante un intervalo temporal denominado DIFS (*Distributed Inter-Frame Space*). Si durante este tiempo el canal se encuentra libre, es decir, cuando la detección de portadora física y virtual indican que el medio está libre, se inicia la transmisión. Por el contrario, si el medio está ocupado se espera durante el intervalo DIFS y a continuación se inicia un temporizador de ranuras temporales o *backoff*. El número de ranuras a esperar se determina con una función aleatoria uniforme entre 0 y $CW-1$. CW (*Contention Window*) comienza con un valor mínimo que se va duplicando en cada retransmisión hasta un valor máximo determinado por el estándar. Este sistema de *backoff* (Figura 2.4b) también se emplea en transmisiones de varias tramas consecutivas, aunque el canal esté libre un tiempo DIFS, con el fin de evitar la captura del canal por otra estación.

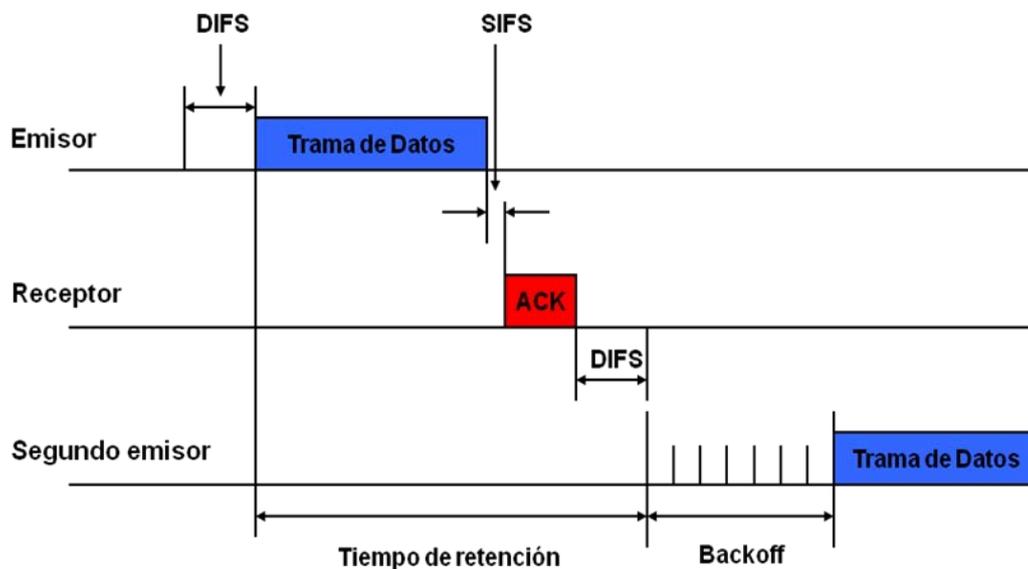


Figura 2.4b Algoritmo de backoff

Una vez que el emisor ha terminado de emitir su trama, espera una confirmación (ACK) del receptor. Dicha confirmación es un mensaje de alta prioridad, por lo que no ha de esperar el tiempo habitual (DIFS) después de que termine la trama, sino que sólo ha de

esperar el tiempo SIFS (*Short Inter-Frame Space*). Durante el tiempo SIFS el receptor ha calculado y comprobado que el CRC (*Cyclic Redundancy Check*) de la trama recibida es correcto. El SIFS debe ser menor que el DIFS para evitar que otra estación detecte libre el canal antes del envío del ACK.

Aunque el mecanismo de detección de colisión es eficiente, ofrece problemas frente a redes con casos de nodo oculto. Este fenómeno se produce cuando una estación transmite información sin ser consciente que hay otra que está transmitiendo simultáneamente a la misma estación. Para dar solución al problema el estándar incorpora un mecanismo denominado RTS/CTS. El procedimiento de transmisión es igual al descrito anteriormente en este apartado, pero antes de comenzar a transmitir datos se envía una trama de control (RTS), informando de la emisión de una trama de datos. El receptor pasado un tiempo SIFS responde con una trama CTS. Si ambas se reciben correctamente se inicia el envío de datos. Las dos tramas de control informan al resto de estaciones del tiempo que el canal permanecerá ocupado.

Este intercambio de tramas provoca una sobrecarga extra que afecta al rendimiento del sistema. Para controlar la activación de este método existe un umbral (*threshold*) de longitud de trama (dependiente de las características del nivel físico subyacente) mediante el cual las tramas de datos por encima de éste son transmitidas precedidas de tramas RTS-CTS.

PCF:

Esta función proporciona servicios libres de contienda. Se utilizan estaciones especiales llamadas puntos de coordinación para asegurar un acceso al medio sin contienda. Los puntos de coordinación se incluyen en los puntos de acceso, así que esta función sólo se utiliza en redes en modo infraestructura. Para ganar prioridad sobre los servicios basados en contienda, la función PCF permite a las estaciones transmitir tramas después de un breve intervalo de tiempo. En la actualidad esta función no se implementa en equipos.

Nivel o capa física:

La capa física se encarga de las conexiones físicas del equipo a la red. Ésta define las características mecánicas y eléctricas de la interfaz de red. Por otra parte, es responsable de la codificación y transmisión al medio de los datos de la subcapa MAC.

Se divide en dos niveles: el PLCP (*Physical Layer Convergente Procedure*) que proporciona la detección de la portadora y la determinación de canal libre mediante la señal CCD (*Clear Channel Assesment*), y el PMD (*Physical Medium Dependant*) encargado de la codificación y transmisión de la señal.

En función de los distintos estándares de 802.11 se determinan modelos de capas físicas con características diferentes. Éste proyecto se centrará en la capa física del modelo 802.11g.

2.5.- Modulación OFDM

El estándar IEEE 802.11g trabaja en la banda de frecuencias ISM de 2,4 GHz y alcanza regímenes binarios de hasta 54 Mbps. Utiliza OFDM para la modulación y transmisión de datos, ofreciendo un rendimiento superior al espectro ensanchado de otros estándares.

OFDM opera dividiendo la portadora en varias subportadoras de menor velocidad que son transmitidas en paralelo. La portadora tiene un ancho de 20 MHz, dividido en 52 canales de 300 KHz cada uno, 48 de estos se utilizan para transmitir datos y los otros son para control de errores. Utiliza distintos esquemas de modulación para alcanzar velocidades binarias de 6 a 54 Mbps. La velocidad de símbolo es igual para todas (250000 símbolos/seg.), variando con cada esquema el número de bits codificados por símbolo (véase Figura 2.5)

Modulación	Bits codificados por portadora	Bits codificados por símbolo	Velocidad (Mbps)
BPSK	1	125	6
BPSK	1	187,5	9
QPSK	2	250	12
QPSK	2	375	18
16QAM	4	500	24
16QAM	4	750	36
64QAM	6	1000	48
64QAM	6	1125	54

Figura 2.5 Relación de modulaciones OFDM

Para permitir la compatibilidad con estándares anteriores como 802.11b, se definen varias especificaciones físicas: ERP-DSSS, ERP-CKK, ERP-PBCC, DSSS-OFDM y ERP-OFDM. Siendo ERP-OFDM el modo básico de la especificación fijado por defecto en las estaciones 802.11g. Es esencialmente igual que el 802.11a pero con modificaciones para garantizar la compatibilidad con el 802.11b.

2.6.- Interferencias

El termino interferencias tiene distintas afecciones dependiendo del contexto en que se utilice. En telecomunicaciones y áreas afines, es cualquier proceso que altera, modifica o destruye una señal en el canal existente entre el emisor y el receptor. El efecto de las interferencias es uno de los más nocivos en las redes inalámbricas, puesto que disminuye la eficiencia de la red.

La banda ISM a 2.4 GHz es una banda de frecuencias sin licencia, por lo tanto, existen numerosas tecnologías transmitiendo que actúan a modo de interferencias. Estas se pueden clasificar en función de si pertenecen a la propia red o a otras redes colindantes en internas o externas. Las interferencias internas son consecuencia de una mala planificación radioeléctrica o debida a las interferencias que hay que asumir en cualquier despliegue radioeléctrico. Las interferencias externas resultan más dañinas al no poderse controlar. Entre éstas a su vez se puede hacer una segunda subdivisión: fuentes bajo el estándar IEEE 802.11 y el resto de tecnologías (Bluetooth, teléfonos inalámbricos, Zigbee, electrodomésticos, etc.).

Uno de los aspectos importantes del despliegue de una red inalámbrica es la caracterización de la relación señal-ruido (SNR, *Signal to noise ratio*) en recepción. Ésta relación depende de las interferencias producidas por las transmisiones de la propia red o de redes vecinas, de problemas debidos a la propagación vía radio de la señal, así como del ruido propio sistema de receptor. El decremento del SNR o de la SIR (*Signal to interference ratio*), la Figura 2.6 aclara ambos conceptos, deteriorará las transmisiones reduciendo la velocidad binaria, como consecuencia del reenvío de tramas.

El estándar 802.11g presenta varias opciones de modulación y codificación para transmitir a las distintas tasas de *throughput* bruto disponibles (6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 y 54 Mbps). Conforme disminuye la velocidad, la modulación a emplear resulta menos

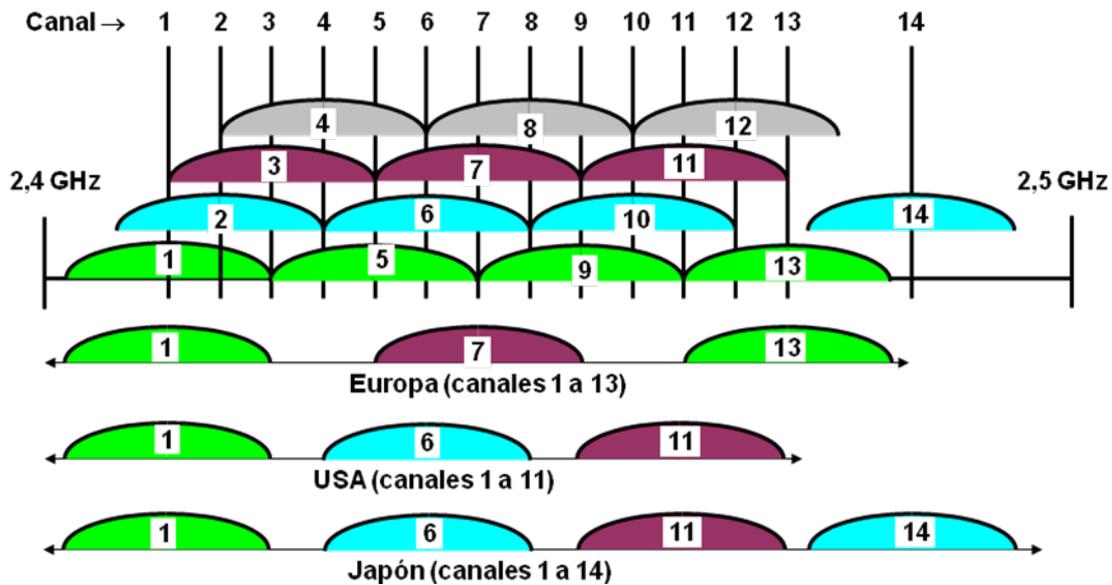


Figura 2.6b Esquema de los canales de los estándares 802.11b/g

Las interferencias en una red inalámbrica pueden entenderse como un contendiente en el acceso al medio o como ruido. En el primer caso, el propio mecanismo de la capa MAC detecta señales ocupando el medio y evita la interferencia retrasando su transmisión; por lo tanto, el régimen binario se reduce como consecuencia de la actuación del protocolo CSMA/CA. En el segundo caso, las interferencias se manifestarán como ruido, con un aumento de las colisiones en la transmisión de paquetes, con la consiguiente recepción de tramas erróneas. La interferencia evaluada como ruido sobre una red WLAN se puede estudiar mediante la creación de un nodo oculto.

2.7.- Nodo oculto

El problema de la estación o nodo oculto es una consecuencia del hecho de que en una red inalámbrica, no todas las estaciones tienen por qué ver a todas las demás. Esto provoca situaciones problemáticas como se refleja en la figura 2.7. Una estación, C, transmite información a la estación B sin ser consciente de que hay otra, A, que está transmitiendo simultáneamente a la misma estación B.

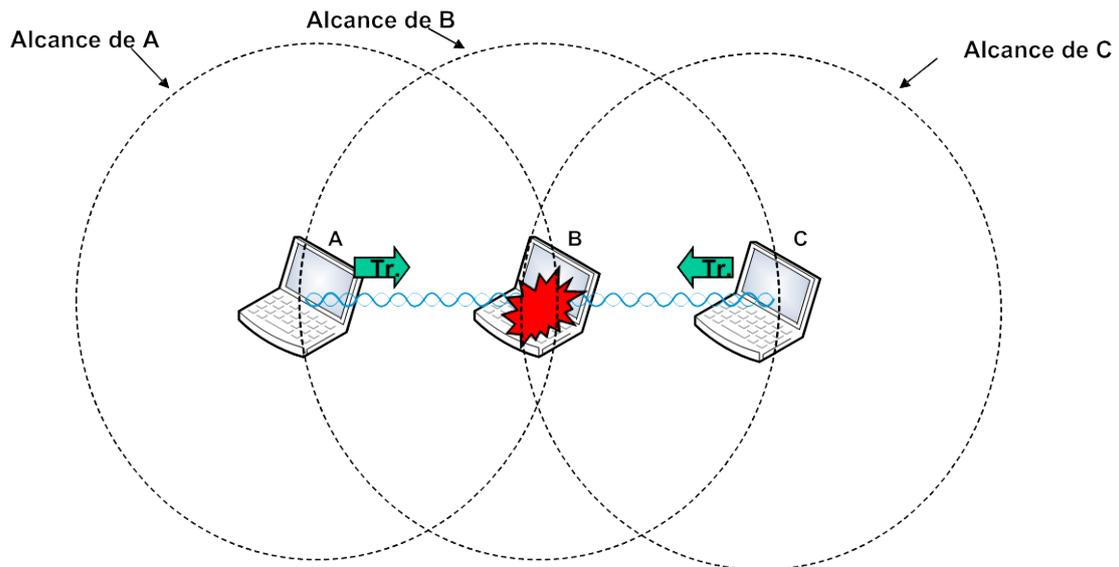


Figura 2.7 Problema del nodo oculto

Se observa que A quiere enviar una trama de datos a B. A detecta que el canal está libre y empieza a transmitir. Instantes más tarde, cuando A está aún transmitiendo, C quiere también enviar una trama a B. C detecta que el canal está libre, ya que el no está dentro del radio de cobertura recibiendo de A. Por lo tanto, C empieza a transmitir y en B se produce una colisión. Consecuentemente B no recibe correctamente ni la trama de A ni la de C.

Como solución a este problema el protocolo DCF incorpora un mecanismo denominado RTS/CTS para asegurar el canal a una estación. Cuando el canal está libre la estación que va a transmitir envía una trama RTS. El receptor, una vez recibida la trama de control si el canal está libre emite una trama CTS. Si ambas se reciben correctamente, se transmite la trama de datos. Ambas tramas de control llevan información acerca de la longitud de la trama a transmitir, informando a las demás estaciones del tiempo que el canal permanecerá ocupado (Figura 2.7b).

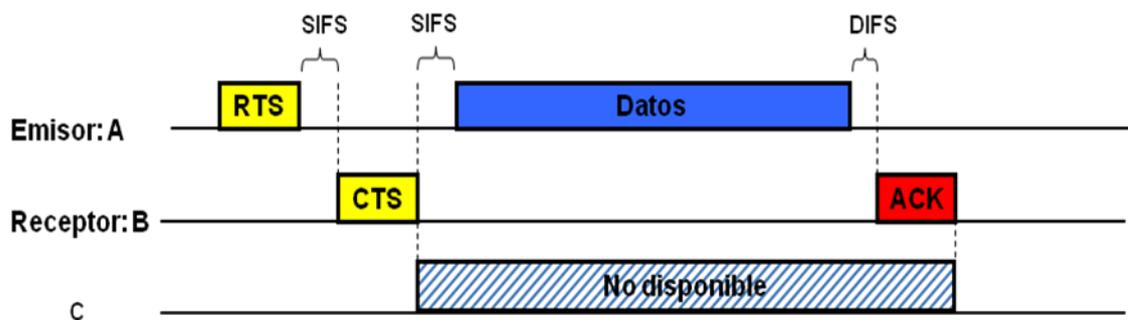


Figura 2.7b Mecanismo RTS/CTS

La figura 2.7c representa de modo grafico el uso de las tramas de control RTS-CTS. El emisor A envía un mensaje RTS a B donde advierte del envío de una trama; además en dicho mensaje A le informa de la duración de la misma. Este mensaje no es recibido por C. Como respuesta al mensaje de A, B envía un CTS en el que le confirma su disposición a recibir la trama de A. Dicho mensaje CTS lleva también indicada la duración de la trama que B espera recibir de A. C no recibe el mensaje RTS enviado por A, pero sí recibe el CTS enviado por B. Del contenido del mensaje CTS C puede saber cuánto tiempo estará ocupado el canal, pues el mensaje indica la duración de la trama a transmitir, evitándose así que C intente transmitir a B.

Este intercambio de tramas RTS/CTS provoca el aumento de la latencia (cada envío ha de ir precedido del intercambio de dos mensajes) y la reducción del rendimiento (*throughput*), al aumentar la proporción de tiempo que el canal se utiliza para enviar mensajes de control. Por lo tanto, RTS/CTS sólo se recomienda su activación en las estaciones que por su distancia o ubicación se sospeche que no se van a escuchar entre sí. Para controlar su activación existe un umbral (*threshold*) de longitud de trama por el cual las tramas por encima de ese umbral son transmitidas utilizando este mecanismo.

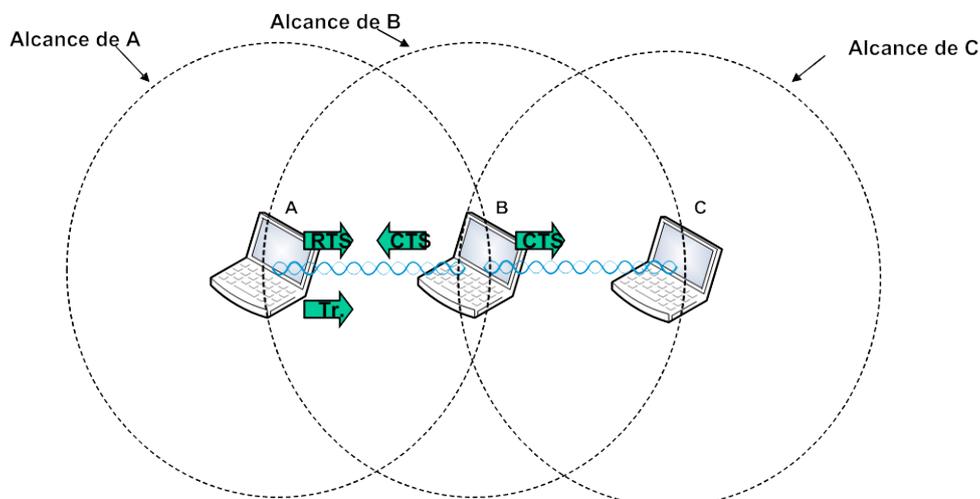


Figura 2.7c Solución al nodo oculto

Capítulo 3 Sistema de medida

3.1.- Introducción

Con el objetivo de cuantificar el efecto de las interferencias, se ha diseñado y montado un banco de medidas específico. Mediante este banco se puede reproducir, bajo unas condiciones de entorno controladas, el comportamiento de una red inalámbrica sometida a la influencia de la interferencia de otra red inalámbrica. De este modo se puede realizar un correcto análisis del efecto de las interferencias sobre un sistema basado en el estándar IEEE 802.11g.

Este capítulo detalla el banco de medida propuesto así como sus componentes, el software utilizado en la simulación y el protocolo de medida para caracterizar el efecto de las interferencias.

3.2.- Banco de medida

El banco de medida se compone de dos redes independientes de tipo infraestructura (BSS), cada una de con dos ordenadores. La figura 3.1 presenta el banco utilizado en el laboratorio para la medida de la influencia de las interferencias en redes IEEE 802.11g se representa en la Figura 3.1. En cada BSS un ordenador está conectado vía inalámbrica al punto de acceso mientras que el otro está conectado al mismo punto de acceso pero vía cable coaxial. Uno de los equipos hace las veces de servidor y el otro de cliente. Los equipos tanto cliente como servidor tiene prestaciones parecidas, con lo que las redes serán lo más similares posibles. Para controlar las interferencias, el medio aire se sustituye en este banco por cableado coaxial. Este cableado coaxial, aunque idealiza el canal en algunos aspectos como selectividad frecuencial o la influencia del multicamino, no implica pérdida de generalidad en los resultados obtenidos dado que no influyen en los aspectos a evaluar. De hecho permite aislar el efecto de la interferencia de otros efectos que también degradan el *throughput*.

La red formada por el servidor interferente y el cliente interferente se denominará par interferente (192.168.1.2) y la formada por el servidor referente y el cliente referente como par de referencia (192.168.1.1). El par interferente será utilizado para crear el tráfico que interferirá sobre el par referente. Las medidas de *throughput* se realizarán sobre el enlace ascendente, donde el equipo conectado por coaxial al punto de acceso actúa como cliente.

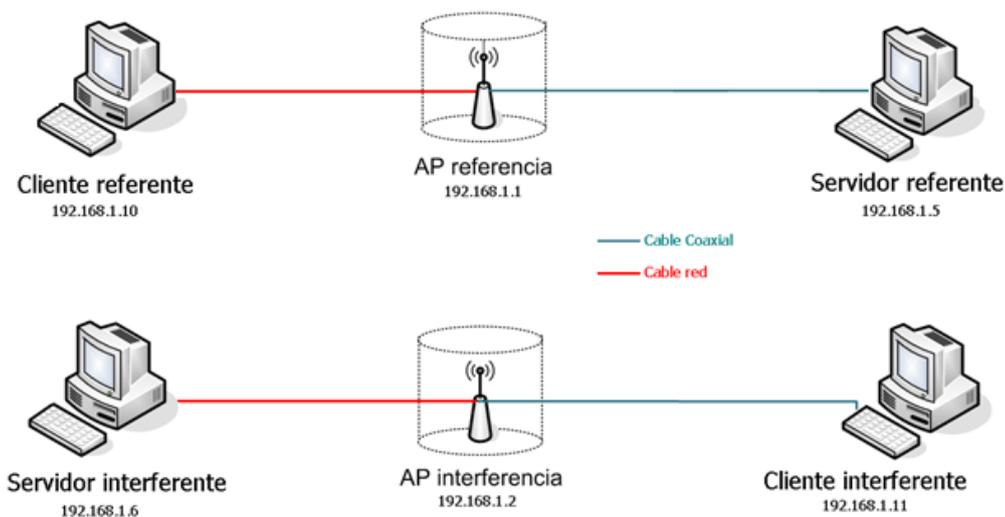


Figura 3.1 Esquema del banco de medida

En condiciones normales, si ambos BSS se detectan uno a otro, el mecanismo CSMA/CA regulará el acceso al medio por todos los contendientes, evitando la

aparición de interferencias. Para conseguir la aparición de interferencias no evitadas, se recurre al esquema de nodo oculto descrito en el capítulo anterior. En este caso el cliente de referencia recibirá de su servidor, pero también del servidor de interferencia. Así el par interferente transmitirá sobre el cliente de referencia sin que el AP de referencia tenga constancia.

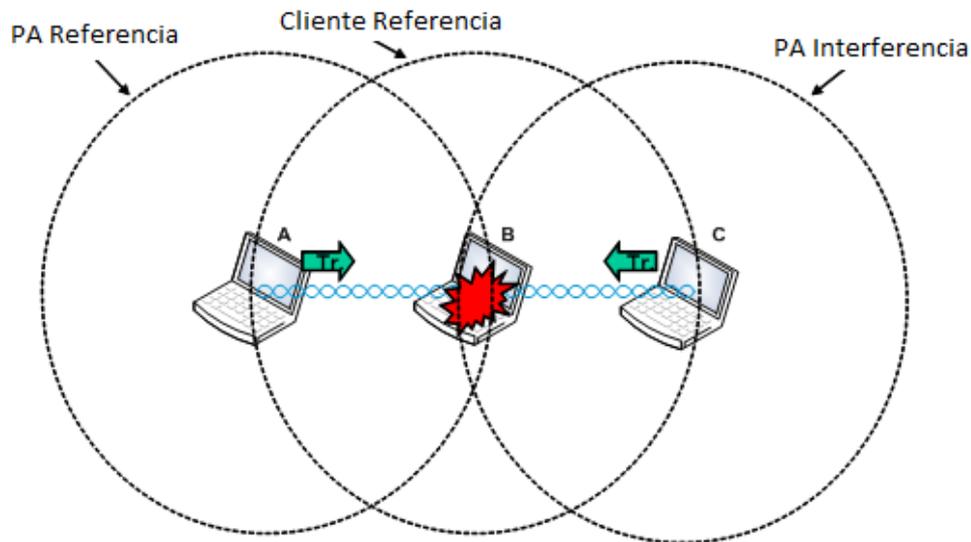


Figura 3.2.- Representación de nodo oculto modelada en el sistema de medida

Para garantizar que el servidor del BSS de referencia no detecta que hay una interferencia ocupando el canal, el banco de medida desarrollado permite la emisión controlada de interferencia sobre el cliente de referencia. Si este banco no se hubiese definido cuidadosamente la radiación interferente también afectaría al servidor de referencia. En este caso actuaría el mecanismo de acceso al medio CSMA/CA, impidiendo reproducir y estudiar los efectos deseados.

A pesar del correcto diseño del banco de medida, los puntos de acceso radian parte de la señal fuera del medio coaxial. Esto representa un problema dado que crean un segundo camino donde ambos puntos se interfieren entre sí, rompiendo el aislamiento generado mediante el circuito coaxial. Para evitar esta interferencia no deseada, se utiliza un apantallamiento especial, que impide que cada punto de acceso emita o reciba desde un medio de transmisión que no sea el coaxial.

En la Figura 3.3 se presenta un esquema detallado del banco de medida sobre cable coaxial. Este banco permite:

- Comunicación del par referente con el interferente únicamente en el extremo del cliente de referencia, reproduciendo una situación de nodo oculto.
- Comunicación dentro del BSS interferente independientemente del otro par. Se garantiza tráfico con las características deseadas, que no se interrumpe o modifica a causa del tráfico del punto de acceso de referencia.

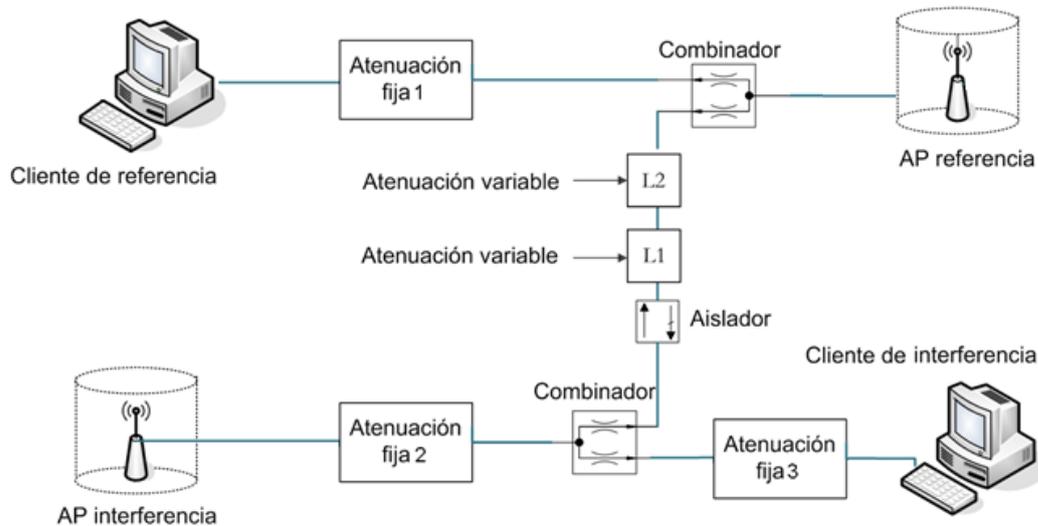


Figura 3.3 Banco de medida para el estudio de interferencias sobre redes 802.11g

Los puntos de acceso utilizados en el proyecto permiten grandes posibilidades de configuración, superando ampliamente las prestaciones de los equipos SOHO (small office – Home Office) o de los destinados al hogar. Se dispone de 2 RouterBoards 411AH cada una con un interfaz radio, (WNC DNMA 92 y TP Link TL-WN861N)

Los dos puntos de acceso disponen de certificado WIFI que garantiza compatibilidad entre equipos WIFI bajo los estándares IEEE 802.11n, IEEE 802.11g, y IEEE 802.11b.

Desde el punto de vista de configuración, se ha desactivado el mecanismo *RTS/CTS* para poder simular el nodo oculto. También se ha desactivado cualquier tipo de seguridad en la transmisión de datos para reducir el overhead. El modo de funcionamiento se ha restringido a *Only-G.*, es decir un modo de funcionamiento que no contempla la convivencia con equipos IEEE802.11b. Por último, las potencias de emisión en ambos pares han sido establecidas a 10dBm.

Por otra parte, el sistema dispone de dos tarjetas de red inalámbricas diferentes, TL-WN350G y D-Link DWA-510, ambas compatibles con los estándares IEEE 802.11b y

IEEE 802.11g. Las tarjetas cliente no ofrecen el conjunto tan amplio de posibilidades de configuración que tienen los puntos de acceso.

El par referente presenta entre el punto de acceso y el cliente un atenuador fijo de 40 dB. Esta atenuación, formado por la conexión en serie de dos atenuadores fijos de 20 dB, proporciona las pérdidas mínimas de propagación en potencia necesarias para mantener al cliente referente dentro del margen dinámico requerido. Se asegura que el cliente no esté saturado y que la potencia del punto de acceso mantenga un nivel de radiación adecuado a las características del par.

En el par interferente se dispone de un sistema similar, compuesto por un atenuador fijo de 20 dB entre el punto de acceso y el combinador y una atenuación de 40 dB entre el combinador y la tarjeta inalámbrica. Estas atenuaciones realizan la misma función de evitar la saturación que en el par anterior.

En cada par, opera un combinador para conducir la señal del punto de acceso interferente al cliente referente de manera unidireccional y controlada. La unidireccionalidad se realiza mediante un aislador de pérdidas mínimas de 30 dB, impidiendo que la señal referente alcance el par interferente. En la tabla 3.1 cómo la potencia mínima del AP referente en el cliente de referencia y en el AP interferente, y la del AP interferente en el AP referente son niveles inferiores a la sensibilidad mínima de las tarjetas de red cliente utilizadas.

Para modificar el nivel de potencia de la señal de interferencia a la entrada de antena del cliente referente, se colocan, en serie con el aislador, dos atenuaciones variables; una de las atenuaciones con rango de [0 70] dB presenta un paso de 10 dB, mientras que la otra atenuación, con rango de [0, 10] dB presenta un paso de 1 dB.

En la tabla 3.1 se muestra el estudio teórico de la potencia recibida en cada punto del sistema, incluidos los puntos de acceso:

	Cliente referencia	Cliente interferencia	AP referencia	AP interferencia
Cliente referencia	-	[-73,5 -153,5]	[-50,55]	[-16,55 -96,55]
Cliente interferencia	[-91,7 -171,7]	-	[-131,6 -211,6]	[-53,3]
AP referencia	[-52,7]	[-136,3 -216,3]	-	[-98,8 -178,8]
AP interferencia	[-85,7 -165,7]	[-44,6]	[-125,6 -205,6]	-

Tabla 3.1 Relación de potencias entre todos los pares

Con esta configuración del banco de trabajo se establece un rango de SIR en el cliente referente de [46 -34] dB para la medida de la influencia de la interferencia en el régimen binario en la red referente. A partir del diseño del banco de medida, la SIR únicamente dependerá de las atenuaciones L_1 y L_2 según la Expresión:

$$SIR = -34 + L_1 + L_2$$

El resto de los elementos del banco de medida quedan detallados en el anexo I del proyecto.

3.3.- Software

En este proyecto se han utilizado dos programas para la medida del *throughput*: NetIQ's Chariot 5.0 e Iperf con su plataforma gráfica Jperf 2.0.2. Ambos programas permiten optimizar las redes y medir el impacto de cambios en el sistema. El uso de este tipo de software automatiza el proceso de medida, ya que genera y envía grandes cantidades de tráfico en la comunicación entre cliente y servidor.

3.3.1 Chariot 5.0

Este software permite enviar tráfico de red a través de diversos protocolos (TCP, UDP, RTP, SPX, IPX) y emula tráfico de cualquier aplicación, incluyendo VoIP, ERP y Web. Dispone de una completa interfaz gráfica que proporciona detalladas estadísticas de la calidad de la comunicación. Durante el proyecto se ha tenido en cuenta diversos parámetros, entre los que destacan los siguientes:

Throughput: Cantidad de datos que son transmitidos hacia o desde algún punto de la red. Este dato ha sido el valor principal de las medidas.

Transaction Time: Número de transacciones del script por segundo.

Response Time: Tiempo, en segundos, necesarios para completar una transacción del script. Es un parámetro inverso al *Transaction Time*.

Confidence Interval: Depende del tipo de test, informa de la calidad de las medidas, valores por debajo de 10.00 indican que es un test válido. Concretamente las medidas obtenidas durante el proyecto se encontraban en el rango de 1.00.

Chariot permite personalizar completamente los datos y el modo de enviarlos gracias a su editor de scripts. De este modo se define un determinado número de paquetes de datos así como un tamaño específico por paquete.

Para un tráfico de tipo TCP/IP se han establecido los siguientes parámetros:

Tamaño de paquete de 1 Mbyte.

Numero de paquetes a enviar fijado en 200 paquetes por test, siendo un valor lo suficientemente alto como para evitar posibles problemas puntuales.

Por otra parte, se pueden definir intervalos de pausa entre cada ráfaga, lo que permite reducir el tiempo que se ocupa el canal de comunicaciones (porcentaje de ocupación del medio). A partir del valor del *Response Time* se puede obtener el tiempo necesario de pausa para lograr cualquier porcentaje de ocupación.

Por último, el software presenta una serie de parámetros que ayudan a mejorar la precisión de las medidas. Uno de ellos es el tipo de visualización de los resultados, en tiempo real (*real time*) o una vez finalizada la medida (*batch*). Los resultados en modo *batch* son más precisos, por lo que los resultados han sido obtenidos de esta manera.

3.3.2 Iperf – Jperf 2.0.2

Aunque Chariot es un programa muy completo presenta varios hándicaps. Por una parte, que requiere de licencia y por lo tanto encarece la solución. Por otra parte, utiliza los parámetros de las conexiones TCP y UDP (tamaños de buffer,...) por defecto. En este sentido Iperf solventa estos inconvenientes; es un software de libre distribución y permite adaptar los tamaños de buffer del socket, anchos de banda de test, etc.

Iperf es una herramienta que nos permite medir el ancho de banda, proporcionándonos información como el *throughput*, el *jitter* (retardo) y *datagram loss* (pérdida de paquetes). Todo ello enviando datagramas TCP/IP o UDP según se especifique. Igualmente dispone de varias opciones para controlar el ancho de banda a generar, como el *buffer* de recepción y transmisión o el tiempo de test.

Jperf es una interfaz gráfica basada en Java para gestionar Iperf lo que facilita la realización de medidas y la reducción de errores en ellas.

En las medidas se ha utilizado la siguiente configuración:

En el servidor:

- Las unidades en las que se quieren ver resultados (Mbits/s).
- Protocolo UDP
- UDP buffer size=1 MByte (Igual que en el cliente)

En el cliente:

- La IP del servidor que va a transmitir.
- Tiempo de test: 30 segundos.
- Protocolo UDP
- UDP Bandwidth
- UDP buffer size=1 MByte (Igual que en el servidor)

Cualquier degradación por el efecto de la interferencia introducirá una reducción del *throughput* y un aumento del *data loss*.

3.4.- Método de medida

Debido a la gran cantidad de redes inalámbricas que afectan al laboratorio donde se realizan las medidas, se ha optado por un medio coaxial en vez del canal radio para el despliegue de las redes bajo test, con el fin de aislar las señales del sistema del resto. El uso del canal radio no permite determinar si los resultados obtenidos son producto de las interferencias generadas o bien de interferencias externas.

Los resultados obtenidos con un sistema coaxial aportan resultados muy similares a los obtenidos con el canal radio. De este modo es totalmente válido realizar unas medidas en un entorno protegido de efectos externos que no son controlables y que podrían afectar a las medidas. Para caracterizar el efecto de las interferencias sobre una red inalámbrica se mide la velocidad de transmisión de datos (*Throughput*) en función de distintas condiciones de la señal interferente. Este proyecto continúa el trabajo desarrollado en otros proyectos fin de carrera [PFC Carlos y PFC Laura Herrero]

Los *data rates* de funcionamiento del estándar IEEE 802.11g son de 54, 48, 36, 24, 18, 12, 9, 6 Mbps. Existen dos formas de seleccionar la velocidad a la que se va a trabajar; se puede obligar al punto de acceso a transmitir a un determinado *data rate* fijo, hasta que las condiciones de señal recibida o SIR lo permitan, o en un modo automático

donde la velocidad es seleccionada por el punto de acceso en función de las condiciones del canal. En funcionamiento *Automático*, el punto de acceso intenta, en primer lugar, transmitir al *data rate* mas alto posible. En función del tiempo de respuesta del cliente y del número de errores de paquete recibido, reducirá el *data rate* para adaptarse a las condiciones del medio. La velocidad en modo *Automático* es la utilizada habitualmente por los puntos de acceso para adaptarse a las condiciones del medio en el que están transmitiendo.

El parámetro que indica cuantos reintentos realizar antes de adaptar el *data rate* se denomina *Hardware Retries (HWR)*. En el estándar IEEE 802.11g este parámetro (HWR) se encuentra definido entre el rango de 4 – 15 intentos. El valor por defecto vendrá determinado por el fabricante del punto de acceso, aunque su ajuste puede mejorar en gran medida la calidad de la comunicación.

En el siguiente caso se dispone de un sistema en el que una interferencia, fijada con un *data rate* de 54 Mbps, afecta al mismo sistema con dos valores extremos de HWR: 4 y 15.

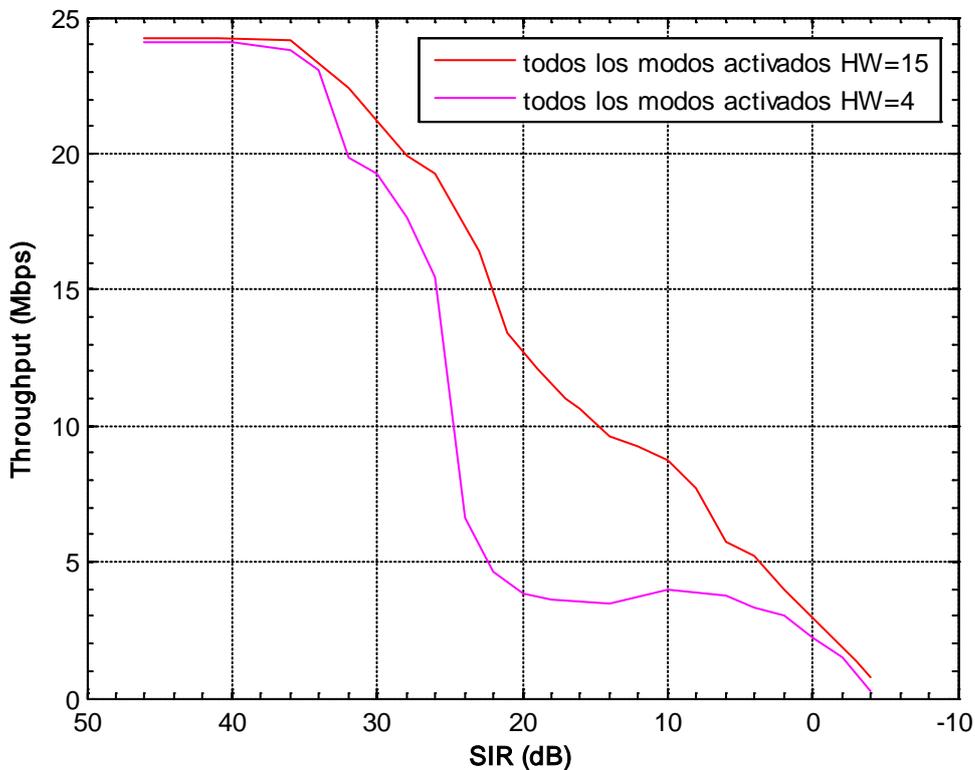


Figura 3.4.- Throughput respecto SIR en función del HW retries

Como se puede apreciar en la figura 3.4, el parámetro HW presenta un papel importante en la calidad de la comunicación cuando se presentan interferencias. En el caso presentado, cuando la SIR cae por debajo de 32dB el sistema con HW=4 presenta una brusca caída en el *throughput* dado que produce caídas rápidas de su *data rate* constantemente. Valores altos de HW retries, aunque aumentan el retardo (ya que se pueden llegar a producir muchos reintentos antes de conseguir el envío con éxito), al trabajar con *data rates* mayores, permiten que el *throughput* no sufra tanta degradación. Por ejemplo, para una SIR de 20 dB, el sistema con HWR=15 está transmitiendo con un *data rate* de 18 Mbps, mientras que con HWR=4 está transmitiendo con el *data rate* menor, 6 Mbps.

En las medidas realizadas en los estudios de este proyecto, se ha fijado el valor de HWR=10, siendo un valor apropiado de funcionamiento.

Capítulo 4 Caracterización experimental

4.1.- Introducción

Este capítulo presenta el estudio de la degradación en el rendimiento de una red IEEE 802.11g cuando sufre el efecto de las interferencias. Este estudio se realiza de manera experimental en base al análisis de los datos recogidos mediante medidas en el capítulo anterior. Las condiciones de la simulación con las que se busca reproducir las diferentes situaciones de interferencia quedan descritas en el capítulo anterior. Gracias a la medida y el análisis de información obtenida se caracteriza el efecto de interferencias inalámbricas IEEE 802.11g con distintas características sobre sistemas IEEE 802.11g.

El capítulo comienza con la comparación del *data rate (throughput bruto)* del estándar IEEE 802.11g con el *throughput* neto, en condiciones ideales en las que un único cliente está conectado al punto de acceso. Posteriormente se realiza un estudio de las interferencias en modo cocanal en función del nivel de potencia de la señal interferente respecto a la señal referente y en función de otras características de la señal interferente. Por último se evalúa como se reduce el efecto de las interferencias cuando su canal se aleja del canal en el que trabaja la señal referente.

4.2.- Throughput bruto vs throughput neto

En este primer punto se estudia un aspecto clave como es la velocidad de transmisión de datos. Este parámetro es determinante a la hora de valorar la calidad un sistema de comunicaciones. El protocolo sobre el que establece la comunicación crea importantes diferencias entre la velocidad de transmisión bruta y neta. Este aspecto es muy importante ya que impide alcanzar los 54 Mbps máximos del estándar IEEE 802.11g.

Con el banco de medidas desarrollado, es posible simular en condiciones controladas una situación ideal, libre de interferencias. En esta situación se mide la diferencia entre las velocidades de trabajo del estándar (*data rates*) y las velocidades netas (*throughput*).

En la tabla 4.1 se presentan los resultados obtenidos, mostrando para una comunicación tipo TCP y en condiciones ideales con un único cliente la diferencia entre el régimen de transmisión bruto y neto.

<i>Throughput</i>		
Bruto (Mbps)	Neto (Mbps)	Perdidas
54	24,175	55,2%
48	22,635	52,8%
36	19,727	45,2%
24	14,738	38,6%
18	11,753	34,7%
12	8,483	29,3%
9	6,693	25,6%
6	4,606	23,2%

Tabla 4.1 Comparativa de throughput bruto y neto para el estándar IEEE 802.11g

Se observa que hay una gran variación entre el valor bruto y el neto, y como esta diferencia aumenta cuanto mayor es la modulación utilizada. Es interesante observar que en el peor caso, el *throughput* es un 55% inferior al *data rate* bruto (54 Mbps). Estas diferencias son debidas al *overhead* que introduce en las distintas capas (física y enlace) del protocolo de comunicaciones IEEE 802.11g.

4.3.- Degradación por CSMA/CA

La interferencia en una red inalámbrica puede comportarse como un contendiente en el acceso al medio o como ruido (caso de nodo oculto). En el primer caso, el propio mecanismo de la capa MAC detecta señales ocupando el medio y evita la interferencia retrasando su transmisión, es decir, la interferencia degrada el régimen binario por el propio mecanismo CSMA/CA.

La figura 4.1 muestra como el medio de acceso se reparte con cada cliente añadido, tomando como referencia los 24 Mbps obtenidos como mejor caso en el apartado anterior, traduciéndose en una reducción de *throughput* máximo por cliente. Esta situación es la que cabía esperar, puesto que el medio debe compartirse entre todos como consecuencia de la aplicación del protocolo CSMA/CA.

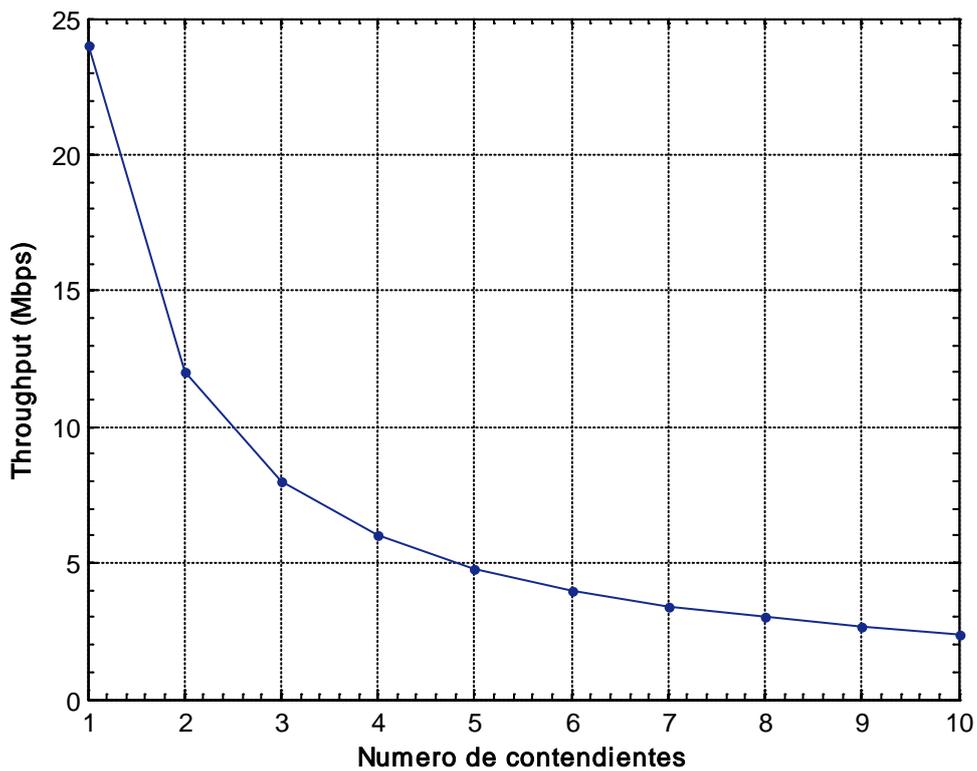


Figura 4.1 Comparativa de *throughput* en función del número de contendientes

A partir de los resultados obtenidos, se puede concluir que las fuentes interferentes actúan como contendientes por el medio. El control de acceso al medio (CSMA/CA) impide el acceso simultáneo al medio de varias fuentes, obligando a retrasar las transmisiones mientras el medio esté ocupado. Por tanto, las interferencias en este caso

reducen el régimen binario de cada cliente, siguiendo el *throughput* neto por cliente (R_{bc}) la expresión (4.1)

$$R_{bc}(Mbps) = \frac{R_b}{N_c} \quad (4.1)$$

Siendo R_b es el *throughput* neto para un solo cliente y N_c el número de clientes.

4.4.- Degradación por interferencia co-canal

Para estudiar el efecto de la interferencia sobre el *throughput* neto, se han llevado a cabo diversas campañas de medida, evaluando en cada campaña la influencia de la interferencia bajo diferentes situaciones.

Un aspecto clave del proyecto es el estudio del efecto de la interferencia sobre una red inalámbrica IEEE 802.11g, actuando como ruido, en función de la SIR. Gracias al banco de medida se controla el nivel de la interferencia recibida de manera gradual, de este modo, podemos obtener una relación directa y controlada entre el nivel de la señal de información y el nivel de ruido.

4.4.1.- Influencia de la SIR

En este apartado se evalúa como varía dicho *throughput* en función de la relación entre la señal de referencia y la interferencia (SIR). La figura 4.2 presenta el *throughput* para un rango de SIR entre 50 y -10 dB con un protocolo de transmisión TPC.

El par interferente transmite con un *data rate* de 54 Mbps mientras que el par referente transmite en modo *Only-G* y con la capacidad de adaptar su *data rate* en función de las condiciones del canal. Así cambiará a un *data rate* inferior cuando supere un número determinado de reintentos de envío fallidos.

Para valores de SIR altos, superiores a 36 dB, la influencia de la interferencia es despreciable manteniendo el régimen binario sus valores máximos. A partir de este valor, la interferencia producida sobre la señal de referencia se hace patente y en consecuencia el *throughput* neto comienza a descender. A partir de los 36 dB de SIR, la pendiente es prácticamente constante y pudiéndose hacer una aproximación lineal, se pierden 5 Mbps de *throughput* por cada reducción de 4 dB en la SIR.

El descenso del régimen binario se produce a causa del incremento en la tasa de error en recepción. El cliente recibe cada vez con más errores, por lo tanto, son necesarias más retransmisiones. Al aumentar la tasa de error, el sistema intenta adaptarse a un entorno más hostil pasando a modulaciones menos exigentes y por tanto reduciendo la velocidad de transmisión de datos.

El aumento de los fallos de recepción se traduce en un descenso del *throughput* debido al aumento del número retransmisiones y a la reducción del *data rate* producida por la adaptación al medio.

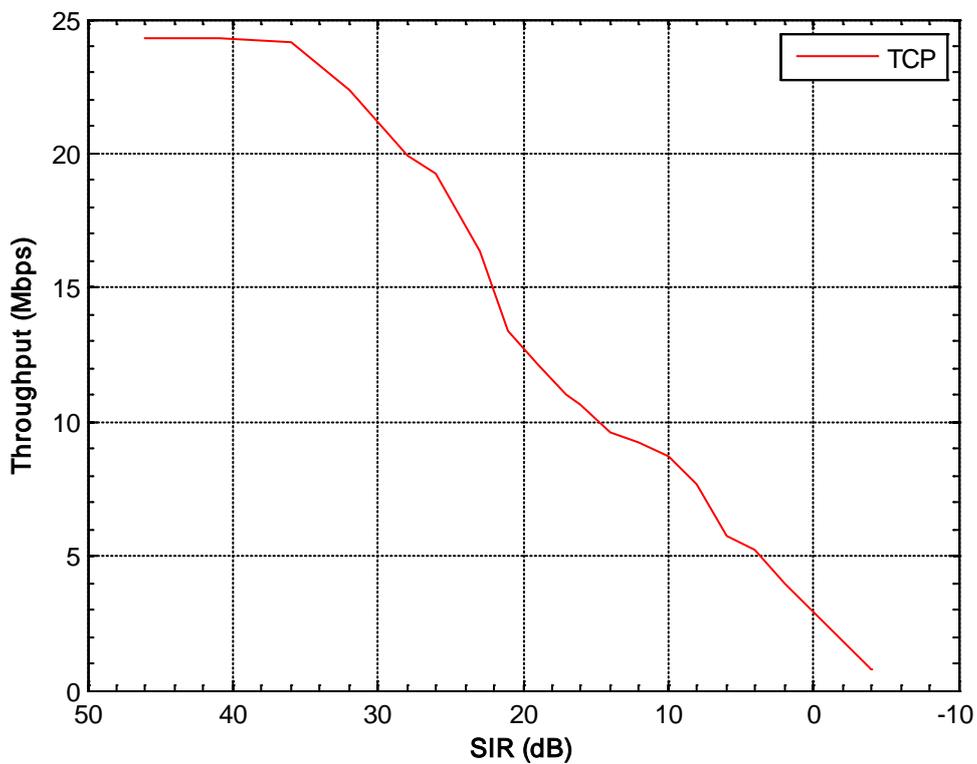


Figura 4.2 Throughput en función de la SIR (TCP)

El número de intentos es un factor importante a la hora de transmitir, como quedó demostrado en el capítulo 3. Si el sistema intenta demasiadas veces adaptarse al entorno, estará constantemente cambiando el *data rate*, lo que se traduce en pérdidas de transmisión y una reducción del *throughput*.

4.4.2.- Influencia de la SIR sobre data rates fijas

Otro aspecto importante, es valorar como afectan las interferencias en función del *data rate* del par referente. Tal como hemos observado hasta ahora, una red inalámbrica

IEEE 802.11g está constantemente adaptándose al medio variando su *data rate*, por lo que en un sistema real podemos encontrarnos transmitiendo en cualquier *data rate* que se encuentre dentro del estándar.

Previsiblemente, cuanto mas bajo sea el *data rate*, más robusta es su modulación y por tanto menor será el efecto que provoque la interferencia sobre la señal referente. En este apartado se analizara el efecto que sufre cada una de las diferentes modulaciones en función de la SIR para una comunicación TCP.

En la figura 4.3 se muestra una gráfica con los resultados obtenidos de manera individual, es decir, para *data rates* fijados a un valor concreto de los permitidos por el estándar. Por otra parte, la señal interferente trabajará en condiciones óptimas a un *data rate* de 54 Mbps. En esta primera parte del estudio, tanto el canal referente como el interferente se encuentran en el mismo canal de transmisión (cocanal).

Se observa como a mayor *data rate*, más susceptible es la modulación de ser afectada por las interferencias a un mismo nivel de SIR. Por ejemplo a 25dB de SIR, la modulación de 54 Mbps empieza a caer bruscamente, mientras que la modulación de 12 Mbps apenas ha variado.

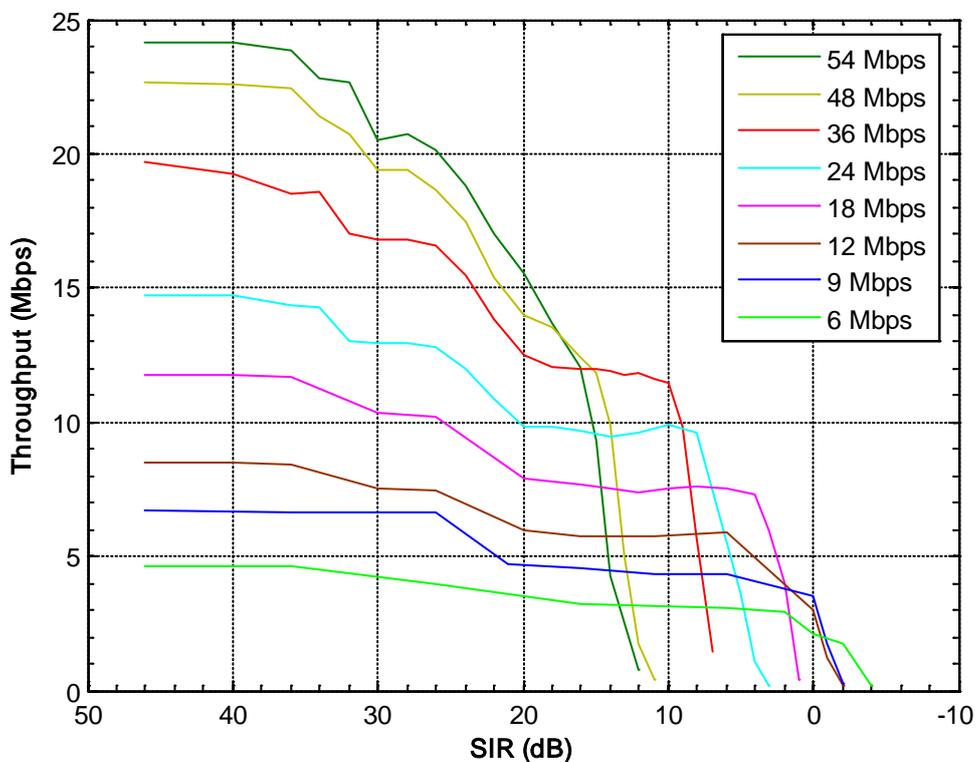


Figura 4.3. Throughput con data rate fijos. (TCP)

Tal como se explicó en el capítulo 2, un *data rate* de 54 Mbps utiliza una modulación 64QAM mientras que en otro extremo, el *data rate* de 6 Mbps utiliza una modulación BPSK la cual es más robusta frente al ruido. Por este motivo las modulaciones bajas se utilizan siempre para enviar las cabeceras y tramas de control dado que se debe garantizar al máximo su recepción sin retransmisiones.

En la siguiente gráfica, figura 4.3b, se incluye el efecto con el punto de acceso en modo *Automático*, donde el *data rate* si se adapta al entorno y varía su modulación en función del número de fallos en recepción.

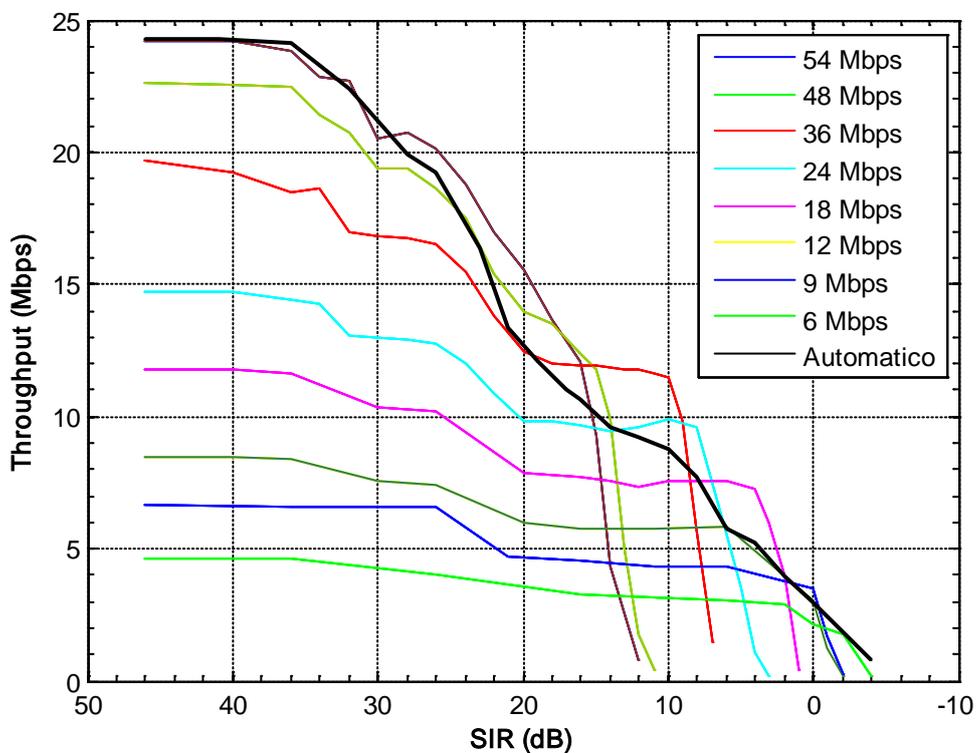


Figura 4.3b. Throughput con data rate Automático. (TCP)

Se aprecia como el caso con todos los *data rates* disponibles recorre una línea con una pendiente bastante suave y uniforme, lo que indica que el modo auto funciona adecuadamente, aproximando el *throughput* al mejor caso de cada una de las modulaciones del estándar.

4.4.3 Influencia del grado de ocupación de canal

En este apartado estudia el efecto del grado de ocupación del canal por parte de la señal interferente. En este caso se presenta una comunicación UDP.

La figura 4.5 presenta el *throughput* en función de la SIR para diferentes grados de ocupación temporal del canal por parte de la señal interferente ($T_I\%$). Para valores altos de SIR, el enlace consigue un *throughput* de 28 Mbps. cuanto menor es $T_I\%$, menor es el valor de SIR a partir del cual comienza a caer el *throughput*, aunque dichas caídas presentan pendientes similares.

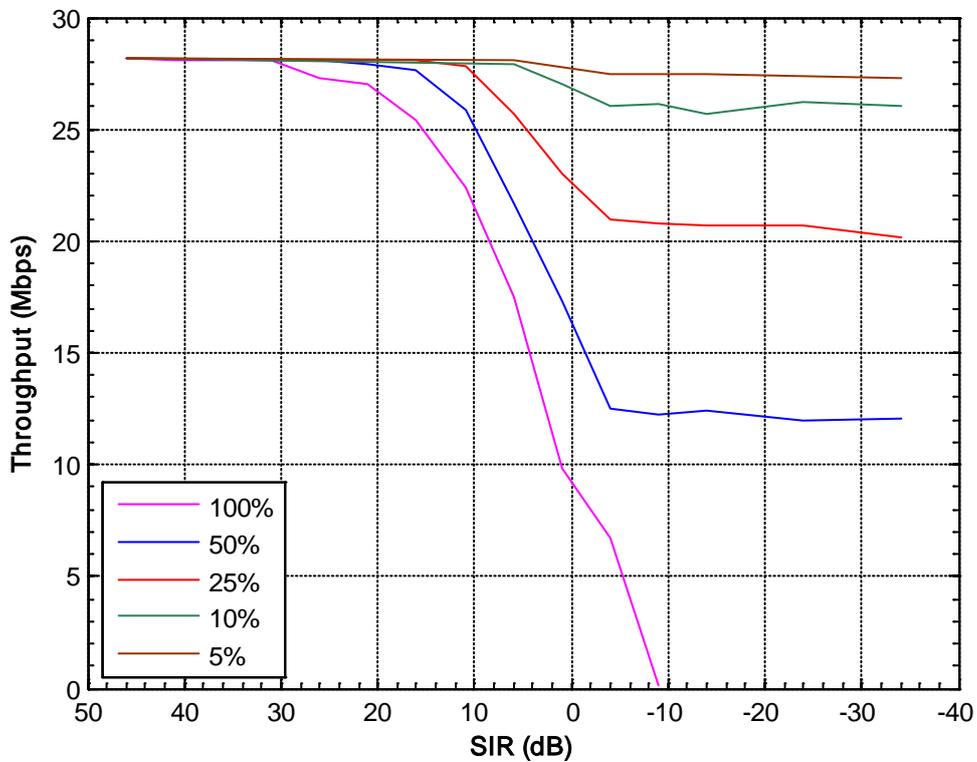


Figura 4.5 Throughput en función de SIR y nivel de ocupación.

Para valores bajos de SIR, todas las curvas con $T_I\% \neq 100\%$ se mantienen estacionarias en el siguiente valor $R_{b,F}$ (4.1),

$$R_{b,F} = R_{b,I} \times (1 - T_I\% / 100) \quad (4.1)$$

Siendo $R_{b,I}$ el *throughput* en condiciones ideales. Así con un nivel de ocupación al 50% el *throughput* se estabiliza a un valor de aproximadamente 14 Mbps, mientras que con un porcentaje del 25% alcanza los 21 Mbps.

Por otra parte, a partir de estos resultados, también se observa como reducciones en el $T_1\%$ son equivalentes a aumentos en la SIR. Cuando se divide entre 2 el $T_1\%$ para un cierto SIR se obtiene un *throughput* equivalente al que se obtendría para ese mismo $T_1\%$ pero aumentando 6 dB la SIR. Por ejemplo, para una SIR de 5 dB, se obtiene un *throughput* de unos 18 Mbps para $T_1 = 100\%$. Si se pasa a $T_1 = 50\%$, para esa SIR se obtienen 22 Mbps. Si en vez de reducir T_1 se aumenta la SIR 5 dB, se consigue un *throughput* similar 22 Mbps.

4.4.4.- Influencia del data rate de la señal interferente

Un último aspecto que se evalúa en la interferencia cocanal es el tipo de *data rate* (modulación) que utiliza la señal interferente. Se han evaluado señales interferentes con 4 posibles *data rates*, cada uno de ellos con una modulación: 54 Mbps con 64 QAM, 36 Mbps con 16 QAM y 18 y 12 Mbps con QPSK.

La figura 4.5b presenta los resultados obtenidos. En estos resultados se puede apreciar como las interferencias con modulaciones más sencillas afectan de manera menos desfavorable al rendimiento del enlace inalámbrico.

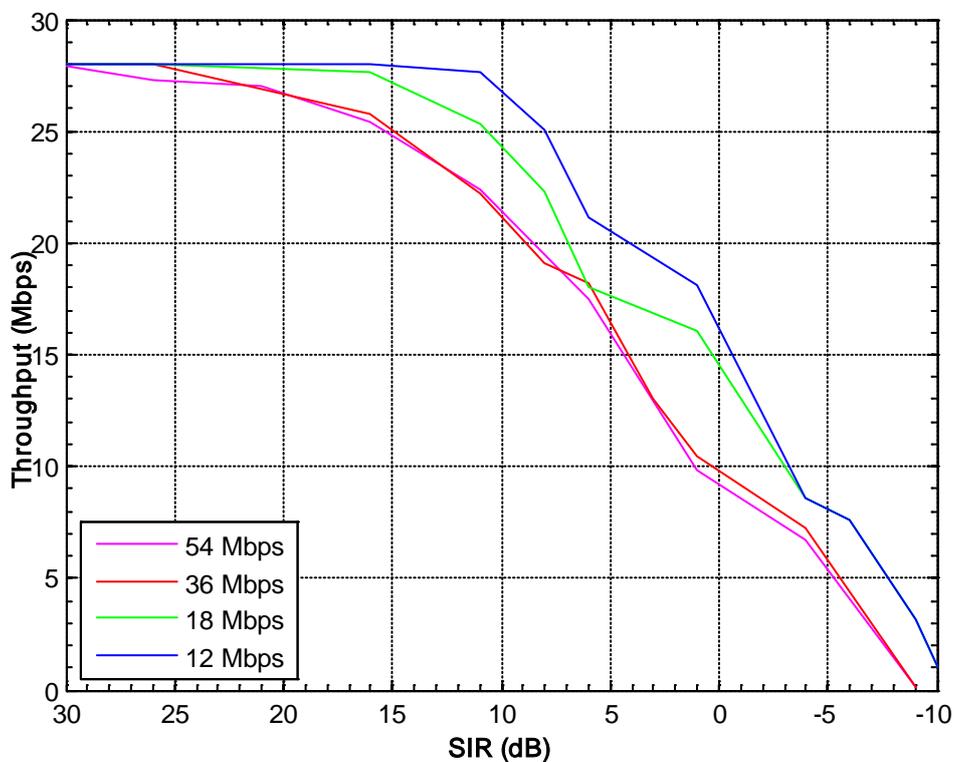


Figura 4.5b Throughput en función de SIR y data rate interferente.

4.5.- Medidas canal adyacente

El estándar IEEE 802.11g utiliza la banda de frecuencias de 2,4Ghz. Tal como se explicó en el capítulo 2, en Europa están establecidos 13 canales utilizables por redes de área local, donde cada uno de estos canales está desplazado 5 MHz respecto al anterior.

Pasando a detallar la densidad espectral de potencia del estándar IEEE 802.11g indica que la mayor parte de la señal se debe encontrar en un margen de +/- 11 MHz entorno a la frecuencia central (ancho de banda de 22MHz), si bien hay parte que se expande hasta un ancho de banda de 60Mhz, aunque con niveles de -40dBr respecto de la referencia, Figura 4.6.

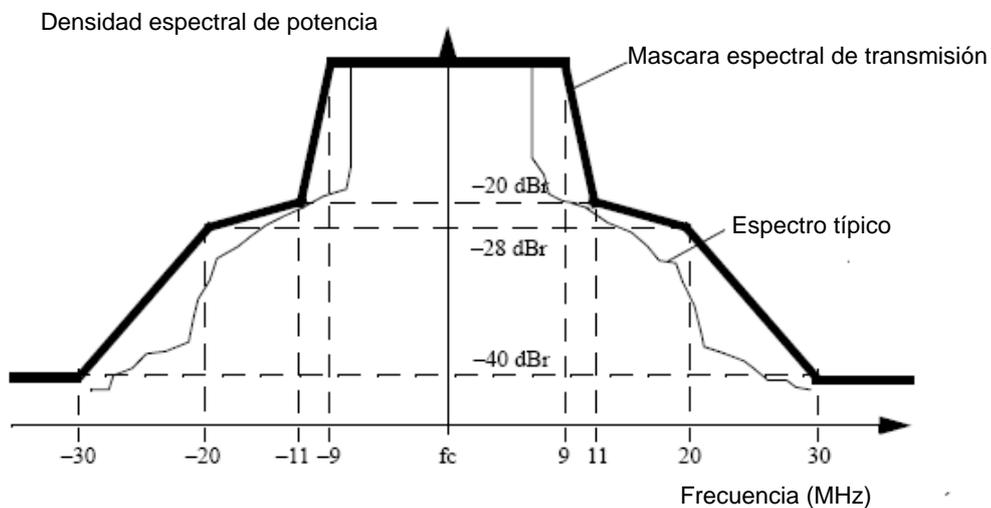


Figura 4.6 Densidad espectral de potencia para una señal OFDM

Considerando el ancho de banda de la señal 22MHz se puede estimar que hace falta una separación teórica de al menos 5 canales con el fin de evitar interferencias entre celdas adyacentes. Al utilizar canales con una separación de 5 canales entre ellos se obtiene una separación final de 25MHz, lo cual es mayor al ancho de banda que utiliza cada canal del estándar 802.11 (22 MHz). El desplazamiento de 5Mhz de cada canal con el contiguo provoca distintos rangos de solapamiento, siendo 100% en cocanal y reduciéndose cuanto mas se aleja del canal de referencia.

4.5.1 Influencia de la SIR

En este apartado se determina como varía el grado de interferencia en función de qué canales estén transmitiendo. La señal interferente trabajará en condiciones óptimas con un *data rate* de 54 Mbps mientras que la red referente estará transmitiendo en modo

auto con todos los *data rates* disponibles. La figura 4.7 muestra el *throughput* respecto a la SIR variando el canal en el que trabaja la señal interferente para una comunicación TCP.

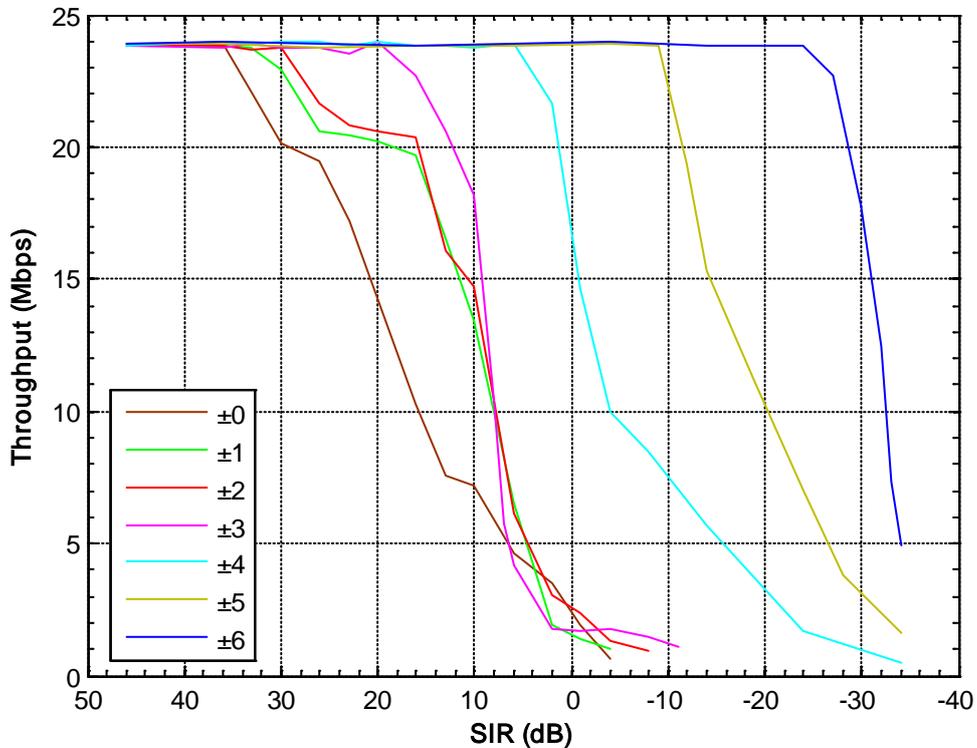


Figura 4.7 *Throughput respecto a canal adyacente*

Cuando la interferencia se encuentra en los canales adyacentes con mayor solape sobre el canal de referencia (± 1 y ± 2), el rendimiento del sistema presenta una degradación similar. Aunque el solape es significativo, aproximadamente entre el 75% y el 50% de la zona principal del espectro, se observan mejores valores de throughput que en el caso cocanal para valores de SIR entre 25 y 10 dB.

Es importante destacar como, cuando la separación es de 20 MHz (± 4 canales) y aun hay cierto solape entre los espectros, el rendimiento obtenido es muy bueno incluso para valores bajos de SIR. Este resultado abre la posibilidad de realizar asignaciones frecuenciales utilizando 4 canales (1, 5, 9 y 13) en lugar de los tres no solapados propuestos habitualmente. Esta posibilidad facilita el reuso frecuencial, aumentando la distancia entre celdas cocanal y por tanto reduciendo la interferencia cocanal.

Para separaciones superiores, ± 5 , ± 6 , el rendimiento solo se degrada para niveles de SIR muy bajos. En estos casos, aunque la parte principal de ambos espectros no sufre solapamiento, es la falda del espectro de la señal interferente (lóbulos secundarios que

conforman el espectro de la señal OFDM) la que con valores de SIR bajos gana importancia y perjudica a la señal de referencia.

4.5.2 Influencia del grado de ocupación del canal

En este apartado se presenta nuevamente el *throughput* en función de la SIR pero disminuyendo el nivel de ocupación de la señal interferente. Tal como se explicó en el capítulo 3, este nivel de ocupación se consigue pausando la interferencia por cada paquete enviado.

La figura 4.8 presenta el *throughput* en función de la SIR para un grado de ocupación del canal por parte la señal interferente del 50%.

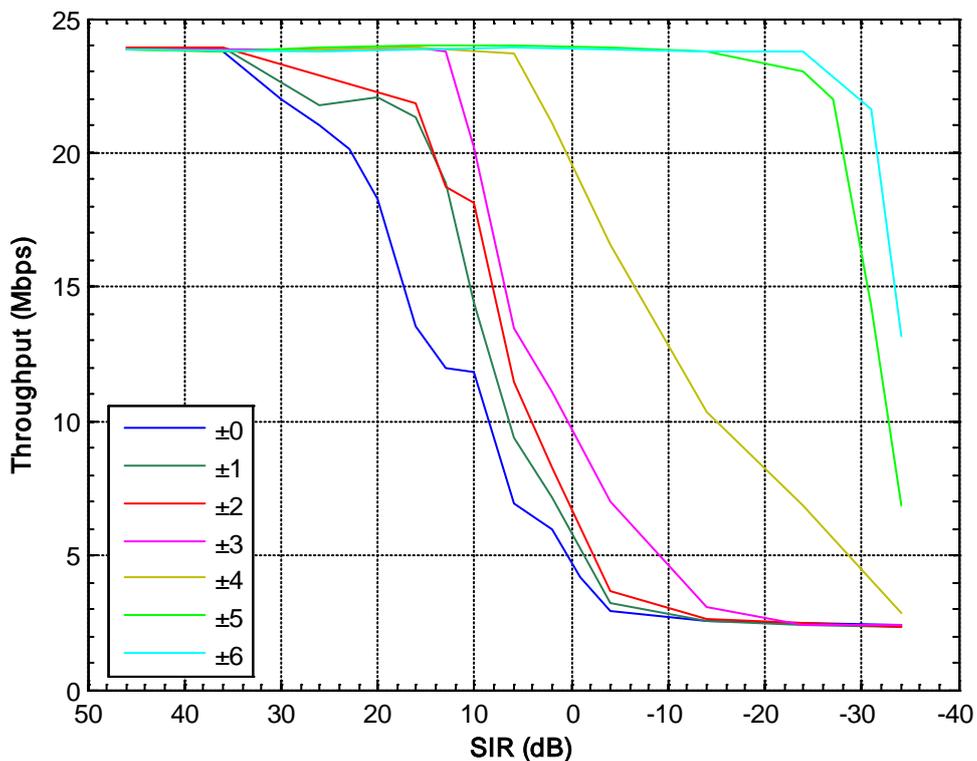


Figura 4.8 Throughput en función de la ocupación de canal

El resultado obtenido es una suma de los estudios anteriores. Se aprecia como gracias a la reducción del grado de ocupación temporal de la señal interferente, la comunicación no llega a cortarse.

Por otra parte, todas las curvas han sido desplazadas hacia la derecha, ya que el efecto de la interferencia sobre la señal de referencia es menor y por tanto pueden alcanzar un

mayor *throughput* para un mismo nivel de SIR. Destaca el salto que sufre la curva para una separación de ± 5 canales, la cual presenta un rendimiento similar al obtenido para una separación aun superior.

Capítulo 5 Conclusiones y líneas futuras

5.1.- Conclusiones

El objetivo del proyecto es analizar el efecto de las interferencias sobre una red IEEE 802.11g en diversas situaciones, profundizando en el estudio con una amplia campaña de medidas. Para ello, se diseña y construye un banco de medidas concreto, donde se controla la red en estudio respecto a posibles interferencias presentes en el entorno.

La primera conclusión obtenida de este proyecto es que del *throughput* bruto al neto existe una gran diferencia, la cual aumenta cuanto mayor sea el *data rate* a la que se transmite. Esto es debido a la complejidad de las tramas de control introducidas por el propio estándar, ya que reducen la cantidad de información útil que puede ser enviada en cada ráfaga. También hay que valorar que nuestro estudio se ha realizado sin ningún tipo de protección de datos ni con sistemas RTS/CTS activados, lo que implicaría un un mayor *overhead* y consecuentemente una disminución de la transferencia neta.

Por otra parte, sabemos que el número de clientes es un factor clave a la hora de determinar la velocidad de los mismos, ya que se rigen por una división equitativa del canal entre el número de contendientes.

En el caso cocanal determinamos que hasta un determinado valor de SIR los efectos de las interferencias sobre una red inalámbrica basada en IEEE 802.11g son prácticamente nulos, pudiendo transmitir al *throughput* máximo. También hay que valorar que las condiciones mejoran si se reduce el nivel de ocupación y por supuesto es decisivo el *data rate* al que se está transmitiendo.

Con los resultados obtenidos sobre los efectos en los canales adyacentes se plantea el debate del número de canales y la separación entre estos. Si no hay un gran número de redes compitiendo por el medio lo ideal sería dejar la mínima separación posible sin solapamiento abarcando toda la banda disponible, lo que serían canales 1, 7 y 13. Por otra parte, también hemos comprobado que cuando nos encontramos en una separación de ± 4 canales las condiciones mejoran enormemente, lo que podría llevar a un sistema de 1, 5, 9 y 13. Esto permitiría aumentar el número de redes diferentes compitiendo por el mismo espacio si bien habría que tener más en cuenta el nivel de interferencias que hubiera.

El hardware puede influir considerablemente en la calidad de una red inalámbrica, no solo por los niveles de potencia que suministren, sino por las posibilidades que brinden a la hora de configurar parámetros.

5.2.- Líneas futuras

Un estudio interesante sería realizar un análisis del efecto de interferencias producidas por una red inalámbrica basada en el IEEE 802.11n sobre una red de este mismo estándar. Por otra parte, como aun se está empezando a dar el salto sobre dicho estándar y conviven ambos sistemas simultáneamente, sería apropiado analizar el efecto de una red IEEE 802.11g sobre una red IEEE 802.11n y viceversa.

Debido a las características especiales del estándar IEEE 802.11n y el uso de dos canales espaciales, provocaría un cambio importante en banco de medida, lo que implicaría un rediseño completo del mismo.

Por otra parte, hay varios puntos interesantes de estudio referentes a interferencias en redes inalámbricas, el más importante el sistema RTS/CTS que no se ha podido incluir en el presente proyecto. Un aspecto interesante también sería comprobar como afecta el nivel de seguridad (WEP, WAP, WAP2) en el *throughput* neto en los estándares IEEE 802.11g/n.

Por último, existen varios protocolos propietarios que pueden proporcionar un mejor *throughput* en determinadas circunstancias, de los cuales no existe apenas documentación, mas allá de lo que suministra el fabricante. Se basan en reducir el *overhead* asociadas a la conexión inalámbrica y se les denominan *Frame-Burst*. Varios fabricantes aportan diferentes soluciones, como son las siguientes: Nitro de Intersil, Super G / Afterburner de Atheros y Xpress de Broadcom.

Acrónimos

ACK	Acknowledgement
AP	Access point
BPSK	Binary phase shift keying
BS	Base station
CF	Coordination function
CFP	Contention free period
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with collision avoidance
CTS	Clear to send
CW	Contention Window
DCS	Dinamic channel selection
DIFS	Distributed inter-frame space
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
EIFS	Extended inter-frame space
ESS	Extended Service Set
ETSI	European Telecommunication Standardization Institute
FCC	Federal Communications Commision
IBSS	Independent Baic Service Set
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc
IFS	Inter-frame space
ISI	Intersymbol interference
ISM	Industrial, scientific, medical
ITU	International Telecommunications Union
LAN	Local area network
LLC	Logical link protocol
MAC	Medium access control
MAN	Metropolitan area network
MIFS	Minimum inter-frame space
MIMO	Multiple-input multiple output
OFDM	Orthogonal frequency division multiplexing
PC	Point coordinator
PCF	Point coordination function
PER	Packet error rate
PHY	Physical layer
PIFS	Point coordination function inter-frame space

PNC	Piconet coordinator
QAM	Quadrature amplitude modulation
QoS	Quality of service
QPSK	Quadrature phase shift keying
RF	Radio frequency
RIFS	Retransmission inter-frame space
RSSI	Receiver signal strength indicator
RTS	Request to send
RX	Receiver
SIFS	Short inter-frame space
SINR	Signal to interference plus noise ratio
SIR	Signal to interference ratio
SNR	Signal to noise ratio
TX	Transmitter
WAN	Wide-area network
WEP	Wireless equivalent privacy
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WLAN	Wireless local area network
WPAN	Wireless personal area network

Anexo

Componentes del banco de medida:

Se detallan las características técnicas de todos los elementos empleados en el banco de medida utilizados en el presente proyecto. Se incluyen tanto los datos teóricos aportados por el fabricante como los obtenidos de manera práctica con los elementos de medida disponibles en el laboratorio.

Atenuador variable L_1 de paso 10 dB:

S12 Teórico	S12 Medido
0 dB	0,5 dB
10 dB	10,5 dB
20 dB	20,5 dB
30 dB	30,0 dB
40 dB	40,5 dB
50 dB	50,0 dB
60 dB	60,3 dB
70 dB	69,2 dB

Parámetros S12 del atenuador variable de paso 10 dB



Detalle del atenuador variable con paso de 10 dB

Atenuador variable L₂ de paso 1 dB:

S12 Teórico	S12 Medido
0 dB	0,4 dB
1 dB	1,3 dB
2 dB	2,3 dB
3 dB	3,1 dB
4 dB	4,0 dB
5 dB	4,9 dB
6 dB	5,9 dB
7 dB	6,7 dB
8 dB	7,6 dB
9 dB	8,6 dB
10 dB	9,6 dB

Parámetros S12 del atenuador variable de paso 1 dB



Detalle del atenuador variable con paso de 1 dB

Atenuación fija 1, 2 y 3:

S12 Teórico	S12 Medido
40dB	40,2 dB

S12 Teórico	S12 Medido
19,8 dB	19,9 dB

S12 Teórico	S12 Medido
38,6 dB	38,8 dB

Parámetros S12 de las atenuaciones fijas



Detalle del aislado fijo1



Detalle del aislador fijo 2

Aislador:

S12 Teórico	S12 Medido
0 dB	0,1 dB

S21 Teórico	S21 Medido
20 dB	29,6 dB

Parámetros S12 y S21 del aislador



Detalle del aislador

Combinador:

S12 Teórico	S12 Medido
3 dB	3,3 dB
S13 Teórico	S13 Medido
3 dB	3,6 dB
S23 y S32 Teórico	S23 y S32 Medido
22 dB	25,2 dB

Parámetros S12, S13, S23 y S32 del combinador



Detalle del combinador

Cable coaxial:

S12 Teórico	S12 Medido
0 dB	0,55 dB

Parámetro S12 de un latiguillo de cable coaxial



Bibliografía:

- [1] G BOE. *REAL DECRETO 1066/2001, de 28 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento que establece condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones radioeléctricas y medidas de protección sanitaria frente a emisiones.* 2001.
- [2] BOE. *ORDEN CTE/23/2002, de 11 de enero, por la que se establecen condiciones para la presentación de determinados estudios y certificaciones por operadores de servicios de radiocomunicaciones.* 2002.
- [3] Gast, Matthew. *802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide.* Editado por O'REILLY. 2005.
- [4] Roshan, Pejman, y Jonathan Leary. *802.11 Wireless LAN fundamentals.* Cisco Press, 2003.
- [5] A. Gratton, Dean. *Marketing wireless products.* Elsevier, 2004.
- [6] T.M Nazmul Huda. *Throughput Enhancement of IEEE 802.11 WLAN for Multimedia Communications.*
- [7] Rahman, A, y P. Gburzynski. *Hidden problems with the hidden node problem.* Communications, 2006 23rd Biennial Symposium on, 2006-07-05 .
- [8] Xu, K., M. Gerla, Bae, y S. *How effective is the IEEE 802.11 RTS/CTS handshake in ad hoc networks?* IEEE GLOBECOM, volume 1, November 2002.
- [9] Jeffrey De Bruyne. Wout Joseph. *Evaluation of Link Performance of an Indoor 802.11g Network*
- [10] Tianlin Wang and Hazem H. Refai. *Empirical Network Performance Analysis on 802.11g with Different Protocols and Signal to Noise Ratio Values*
- [11] Blanco, Carlos. *Estudio experimental en entornos controlados de Interferencias 802.11g.* Proyecto Fin de Carrera 2009
- [12] Herrero Urigüen, Laura. *Análisis Experimental de las Interferencias en Redes Inalámbricas IEEE 802.11.* Proyecto Fin de Carrera, 2007.
- [13] Ho, Ming-Ju, Jing Wang, Kevin Shelby, y Herman Haisch. *IEEE 802.11g OFDM WLAN Throughput Performance.* Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Fall. 2003 IEEE 58th, Vol.4, 2252- 2256, 2003.
- [14] Wang, Shao-Cheng, Yi-Ming Chen, Tsem-Huei Lee, y Ahmed Helmy. *Performance Evaluations for Hybrid IEEE 802.11b and 802.11g Wireless*

Networks. 2005.

- [15] Yee, Jung, y Hossain Pezeshki-Esfahani. *Understanding Wireless LAN Performance Trade_offs*. 2002.