

Junio 2012



EVALUACIÓN DE
LA CAPACIDAD DE
REDES 802.11E
TRANSPORTANDO
VOIP

TRABAJO FIN DE CARRERA.
INTEGRACIÓN DE REDES TELEMÁTICAS

UOC - Ingeniería Técnica de Telecomunicación, especialidad
Telemática | Pedro Sánchez Torres

Índice de Contenido:

1. Introducción	7
1.1 Presentación del caso	7
1.2 Justificación y Motivación.....	8
1.3 Herramientas para el desarrollo.....	8
1.4 Planificación	8
2. Norma IEEE WLAN 802.11	10
2.1. Introducción.....	11
2.1.1 Configuración Peer-to-Peer.....	13
2.1.2 Configuración con Punto de Acceso (AP)	11
2.1.3 Configuración de Interconexión de Redes.	13
2.2. IEEE WLAN 802.11	14
2.3. IEEE WLAN 802.11 PHY.....	15
2.3.1. Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS).....	16
2.3.2 Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS):.....	16
2.4. IEEE WLAN 802.11 MAC.....	17
2.4.1 Función de Coordinación Distribuida (DCF).....	18
2.4.2 Función de Coordinación Puntual (PCF)	20
2.4.3 Tramas IEEE 802.11.....	21
2.5. IEEE WLAN 802.11b	23
2.6. IEEE WLAN 802.11a	24
2.7. IEEE WLAN 802.11e	25
2.6.1 Calidad de Servicio (QoS)	26
2.6.2 Hybrid Coordination Function (HCF).....	27
2.6.3 EDCA (Enhanced Distributed Channel Access)	27
2.6.4 HCCA (HCF Controlled Channel Access)	30

3.	Codificación de la voz para VoIP	33
	3.1. Introducción	33
	3.2. Codificación PCM.....	34
	3.3. Recomendación UIT-T G.711	36
	3.4. Recomendación UIT-T G.729	36
	3.5. Recomendación UIT-T G.723.1	37
	3.6. Cuantificación de la calidad de la voz	38
	3.6.2 Medición objetiva.....	39
	3.6.2. Medición Subjetiva:	39
4.	Iniciación a Scilab	43
	4.1. Introducción	43
	4.2. Conociendo la herramienta.	43
	4.3. Sintaxis	45
	4.4. Operaciones	46
	4.5. Gráficos.....	47
	4.5.1. Función plot y plot2d.....	47
	4.5.2. Función subplot	48
	4.5.3. Control de los ejes.....	48
5.	Capacidad VoIP en WLAN 802.11	50
	5.1. Introducción.....	50
	5.2. Diseño del sistema estudiado.	50
	5.2.1. Limitaciones del estudio.....	51
	5.2.2. Consideraciones del sistema.....	51
	5.2.3. Efecto producido por las cabeceras de protocolos.....	53
	5.3. Mejoras QoS del estándar 802.11e.....	54
	5.4. Cálculo de la capacidad VoIP en WLAN 802.11e	55
	5.5. Simulador Scilab	61
	5.6. Resultado de la simulación	63
	5.7. Conclusiones obtenidas de la simulación	68
6.	Bibliografía	70

Índice de Tablas:

Tabla 1 – Planificación del proyecto	9
Tabla 2 – Características de los estándares más utilizados IEEE 802.11	23
Tabla 3 – Prestaciones de los estándares más utilizados IEEE 802.11	24
Tabla 4 – Mapeo prioridad 802.11d – Categoría de acceso 802.11e	28
Tabla 5 – Tiempos (μ s) de espera en IEEE 802.11	30
Tabla 6 – MOS.....	40
Tabla 7 – Deterioro intrínseco de cada códec empleado.....	41
Tabla 8 – Operaciones en Scilab	46
Tabla 9 – Equivalencia MOS – Factor R	52
Tabla 10 – Comparación carga útil vs cabecera.....	53
Tabla 11 – Retraso de paquetización de cada códec.	56
Tabla 12 – Parámetros utilizados.....	56
Tabla 13 – Número máximo de llamadas VoIP para los códec de voz estándar en función de la tasa de transmisión en modo DCF/PCF.....	68
Tabla 14 – Número máximo de llamadas VoIP para los códec de voz estándar en función de la tasa de transmisión en modo EDCA/HCCA.....	69

Índice de Ecuaciones:

Ecuación 1 – Cálculo de AIFS en EDCA	29
Ecuación 2 – Cálculo del factor R.....	40
Ecuación 3 - Cálculo simplificado del factor R	41
Ecuación 4 – Cálculo del parámetro I_d	41
Ecuación 5 – Función de Heavyside	41
Ecuación 6 - mapeo MOS - factor R	42
Ecuación 7 – Periodo de Overhead	57
Ecuación 8 – Periodo de sondeo durante el CFP	57
Ecuación 9 – Llamadas VoIP soportadas durante el CFP.....	57
Ecuación 10 – Periodo de sondeo durante el CP	58
Ecuación 11 – Número de llamadas soportadas durante el CP.....	58
Ecuación 12 – Número de llamadas soportadas durante el CFP	59

Índice de figuras:

Ilustración 1 – Diagrama de Gantt	10
Ilustración 2 – Basic Service Set (BSS)	12
Ilustración 3 – Sistema de Distribución	12
Ilustración 4 – Configuración Peer-to-peer	13
Ilustración 5 – Interconexión de redes	13
Ilustración 6 – Modelo OSI	14
Ilustración 7 – Logotipos IEEE 802.11 y WiFi	14
Ilustración 8 – Familia 802.....	15
Ilustración 9 – Secuencia de Barker	16
Ilustración 10 – Arquitectura de la subcapa MAC	17
Ilustración 11 – Transmisión durante DCF	18
Ilustración 12 – Periodo de Backoff durante DCF	19
Ilustración 13 – RTS/CTS/NAV durante DCF	20
Ilustración 14 – Sondeo durante PCF	21
Ilustración 15 – Trama MAC Genérica	22
Ilustración 16 – Esquema del funcionamiento EDCA.....	28
Ilustración 17 – Diferentes AIFS en EDCA.....	29
Ilustración 18 – CAP durante CP en modo HCCA.....	31
Ilustración 19 – Conversión analógico-digital.....	34
Ilustración 20 – correspondencia gráfica MOS - Factor R.....	42
Ilustración 21 – Web Scilab	43
Ilustración 22 – Apariencia Scilab	44
Ilustración 23 – Ejemplo de la función plot2d	47
Ilustración 24 – Ejemplo de la función subplot	48
Ilustración 25 – Sistema estudiado	50
Ilustración 26 – Sobrecarga en el modo DCF.....	53
Ilustración 27 – Súper trama (SF) IEEE 802.11e.....	55
Ilustración 28 – Relación Polling VS Overhead durante el CFP.....	58
Ilustración 29 – MOS de los códec estudiados en función del retraso de la red.....	59
Ilustración 30 –Número máximo de llamadas VoIP en modo DCF/PCF (SF variable).....	60
Ilustración 31 – Número máximo de llamadas VoIP en modo DCF/PCF (SF fija).....	60
Ilustración 32 – Modelo Lógico del simulador VoIP 802.11e	61
Ilustración 33 – Apariencia del simulador VoIP 802.11e.....	62
Ilustración 34 – Opción ‘Ejecutar archivo en Scilab’	62
Ilustración 35 – Ejecutar programa desde prompt Scilab	63
Ilustración 36 – Variación de la capacidad en función de la SF (11Mbps)	64
Ilustración 37 – Variación de la capacidad en función de la SF (54 Mbps)	64
Ilustración 38 – Variación de la capacidad en función del CP (11 Mbps).....	65
Ilustración 39 – Variación de la capacidad en función del CP (54 Mbps).....	65
Ilustración 40 – Variación de la capacidad en función de la tasa de transferencia	66
Ilustración 41 – Retraso en función de la cantidad de llamadas.	67
Ilustración 42 – MOS en función de la cantidad de llamadas.....	67

1. Introducción

1.1 Presentación del caso

Dadas sus características de movilidad y acceso de alta velocidad, las conexiones inalámbricas representan una tendencia importante en el acceso a internet, sobre todo las redes inalámbricas de área local (WLAN). Al mismo tiempo, la tecnología VoIP está teniendo una gran aceptación, dadas las ventajas que proporciona.

De la convergencia de estas dos tendencias, nace el término VoWLAN (VoIP sobre WLAN), referido a las comunicaciones telefónicas utilizando el protocolo IP a través de una red WLAN.

En consecuencia, las redes WLAN, en especial las públicas, tendrán que soportar un gran número de llamadas VoIP simultáneas. Por este motivo, se estudia la capacidad VoIP en un entorno WLAN que nos proporcione calidad de servicio (QoS), proponiendo un modelo analítico para la evaluación de la capacidad de VoIP en modo HCF (HCCA y EDCA) utilizando el estándar WLAN IEEE 802.11e. Se observará que la súper trama (SF) influye directamente en la capacidad WLAN y el retraso de paquetes de voz.

En este trabajo vamos a desarrollar las conclusiones obtenidas en el artículo '*Capacity Evaluation of VoIP in IEEE 802.11e WLAN Environment*' describiendo todos los pasos dados y como llegamos a ellas. Analizaremos como la ocurrencia de CAPs (Periodos de Acceso Controlado) durante el CP (Periodo de Contención) puede afectar a la capacidad de VoIP a través de WLANs.

Vamos a demostrar la capacidad y rendimiento de cada uno de los códec PCM de VoIP más utilizados en los diferentes estándares IEEE 802.11: G.711 PCM (64 kbit/s), G.729 (8 kbit/s) y G.723.1 (6,3 kbit/s). Para ello necesitaremos un simulador que nos ayude a configurar los diferentes parámetros de las redes inalámbricas así como especificaciones de los códec. Existen varias herramientas matemáticas que nos pueden servir para esta tarea, pero nos decantaremos por Scilab por su facilidad de uso y el hecho de tratarse de software libre.

Para llegar a estos resultados, primero necesitamos una visión general del sistema VoIP que vamos a estudiar e investigaremos la limitación de las redes 802.11 a la hora de transportar VoIP. Por otro lado, podremos comprobar cómo el nuevo estándar 802.11e introduce las mejoras de calidad de servicio y realizaremos un software analítico en Scilab con el que veremos los resultados de forma gráfica. Del mismo modo podremos variar los datos de entrada del problema y obtener resultados diferentes.



1.2 Justificación y Motivación

Desde hace ya algún tiempo, las señales digitales se van imponiendo a las señales analógicas en las telecomunicaciones motivadas por mejoras en la calidad en las transmisiones, facilidad de multicanalización, encriptación más eficiente... Un claro ejemplo es la transmisión de voz donde, cada vez más, vemos como la señal digital y a través de internet es el medio de transporte elegido: VoIP (Voice Over IP).

En poco tiempo, las redes de área local inalámbricas (WLAN) tendrán que soportar a un gran número de comunicaciones VoIP dada la rápida propagación de su uso, especialmente en lugares públicos. Este hecho, propicia que dediquemos este estudio a conocer el comportamiento de las WLAN en función de su carga de comunicaciones VoIP.

Existe gran cantidad de redes inalámbricas de área local implementadas a nivel mundial sobre los estándares 802.11a/b/g pero que no proveen ningún tipo de control o acciones para ofrecer QoS puesto que son previas a la generación del actual 802.11e. Las redes Ethernet tradicionales no tienen este problema para ofrecer QoS, dado el alto throughput de estas redes. En cambio, en las redes inalámbricas se requiere de un estándar que garantice QoS en las aplicaciones en tiempo real para mejorar la efectividad del uso de estas redes.

Investigaremos como podemos aumentar la capacidad de las WLANs mediante la reducción de la tasa de los códecs utilizados y la elección del modo de funcionamiento de los estándares 802.11 y llegaremos a la conclusión de que con la misma tasa de transferencia podemos aumentar la capacidad simplemente cambiando de modo de funcionamiento.

Además, en este estudio veremos que parámetros nos penalizan esta capacidad, y como se relacionan la capacidad con el retraso y la calidad percibida (MOS). Presentaremos un modelo analítico de capacidad VoIP con el fin de evaluar el estándar 802.11e.

1.3 Herramientas para el desarrollo

Para desarrollar el simulador del proyecto, nos apoyaremos en la herramienta Scilab, software matemático orientado al uso de matrices y vectores, que nos proporciona gran capacidad de proceso y la vez nos permite diseñar y codificar el simulador utilizando una programación propia.

La elección de Scilab viene motivada por su facilidad de uso y el hecho de tratarse de software libre. Nos proporciona un entorno de trabajo completo con el que realizar cálculos numéricos complejos, especialmente destinados a ingenierías.

Basándonos en el artículo '*Capacity Evaluation of VoIP in IEEE 802.11e WLAN Environment*' y otros artículos que se mencionan en la Bibliografía, iremos construyendo y ampliando conceptos en este documento.



1.4 Planificación

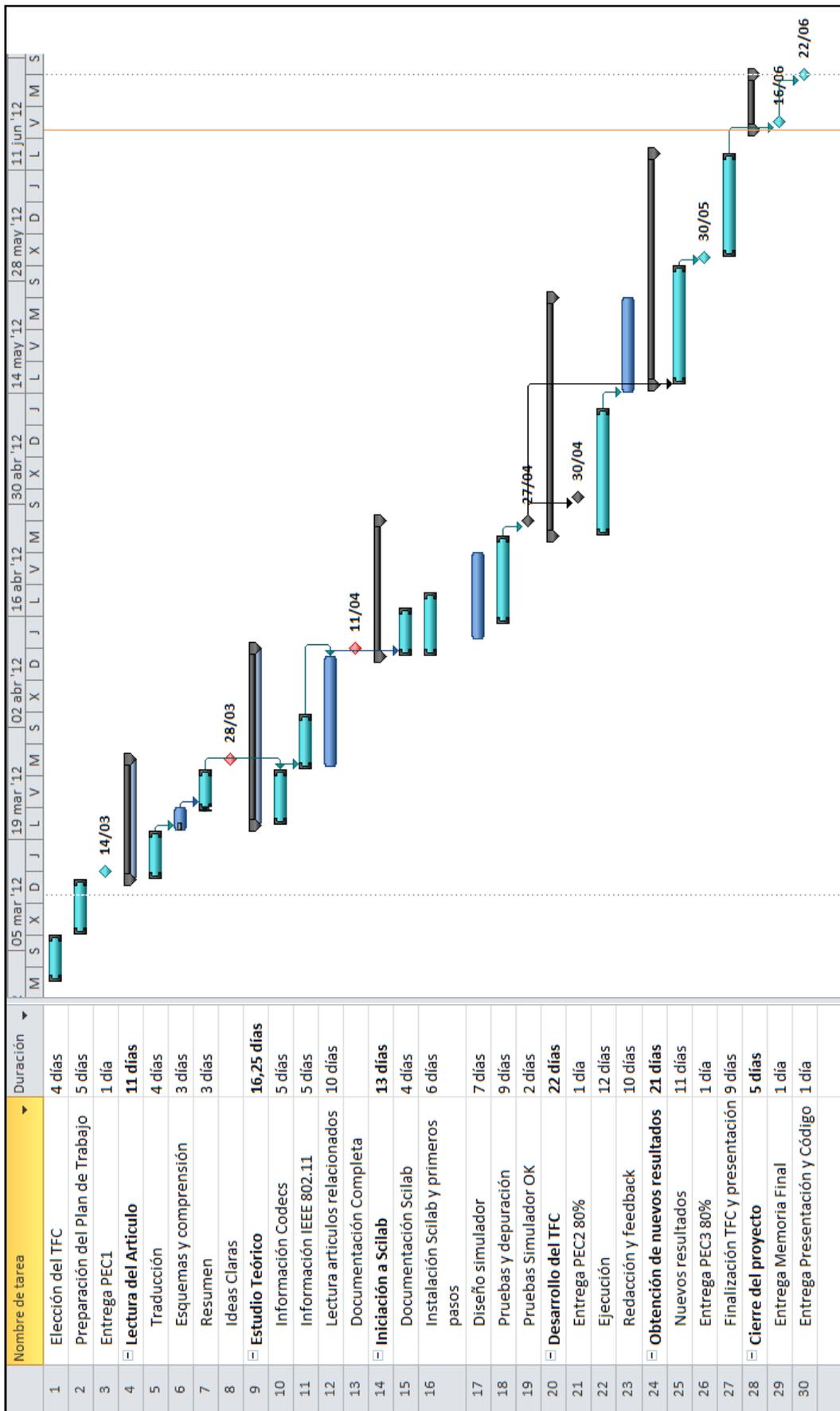
Para la realización del proyecto partimos de la planificación que se estableció en la primera entrega y consta de las siguientes actividades repartidas durante las 17 semanas:

Tabla 1 – Planificación del proyecto

Proyecto Fin de Carrera			
	Semana		Actividad
1	01 Marzo	06 Marzo	Elección del TFC
2	07 Marzo	13 Marzo	Preparación del plan de trabajo
3	14 Marzo	20 Marzo	Entrega PEC1 (10%) Lectura del artículo
4	21 marzo	27 Marzo	Lectura del artículo Recopilar información Códecs
5	28 Marzo	03 Abril	Recopilar información IEEE 802.11
6	04 Abril	10 Abril	Lectura artículos relacionados
7	11 Abril	17 Abril	Documentación e instalación Scilab
8	18 Abril	24 Abril	Diseño simulador y pruebas Scilab
9	25 Abril	01 Mayo	Entrega PEC2 (40%) Depuración Scilab
10	02 Mayo	08 Mayo	Comienzo ejecución TFC
11	09 Mayo	15 Mayo	Ejecución TFC
12	16 Mayo	22 Mayo	Redacción TFC y feedback
13	23 Mayo	29 Mayo	Obtención de nuevos resultados
14	30 Mayo	05 Junio	Entrega PEC3 (80%) Finalización TFC y presentación
15	06 Junio	12 Junio	Finalización TFC y presentación
16	13 Junio	20 Junio	Entrega Memoria Final
17	21 Junio	26 Junio	Entrega presentación y código



Ilustración 1 – Diagrama de Gantt



2. Norma IEEE WLAN 802.11

2.1. Introducción

En este apartado definiremos el estándar IEEE WLAN 802.11 haciendo una breve introducción de las redes locales sin hilos (WLAN), es decir, redes inalámbricas con un alcance de hasta unos 100 metros aproximadamente. Estas redes utiliza ondas electromagnéticas (radio e infrarrojo) para enlazar (los equipos conectados a la red, en lugar de los cables coaxiales o fibra óptica que se utilizan en las LAN convencionales cableadas (Ethernet, Token Ring,...).

Las principales ventajas de este tipo de redes sobre las cableadas que ya conocemos, a grandes rasgos, pueden ser la movilidad, flexibilidad, facilidad de instalación... aunque también nos pueden presentar algunos inconvenientes como la relación velocidad/precio, aunque en esto cada vez hay menos diferencias. Otro inconveniente de las redes inalámbricas es que son sensibles a hornos microondas (los 2,4 GHz son capturados óptimamente por el agua) o cambios de humedad.

Las WLAN se pueden implantar mediante las siguientes tecnologías:

1. Infrarrojos
2. Espectro ensanchado
3. Láser

Las redes WLAN de las que hablaremos utilizan técnicas de espectro ensanchado. Estas técnicas se basan en distribuir los datos en un margen frecuencial de banda ancha (típicamente en torno a los 2,4 GHz o bien a los 900 MHz) mediante un código de expansión que sólo es conocido por el receptor.

La versatilidad y flexibilidad de las redes inalámbricas propician que exista gran variedad de configuraciones que hacen que este tipo de redes se adapte a casi cualquier necesidad. Estas configuraciones se pueden dividir en dos grandes grupos, las **redes peer-to-peer (P2P)** y las que utilizan **AP (Access Point, Punto de Acceso)**.

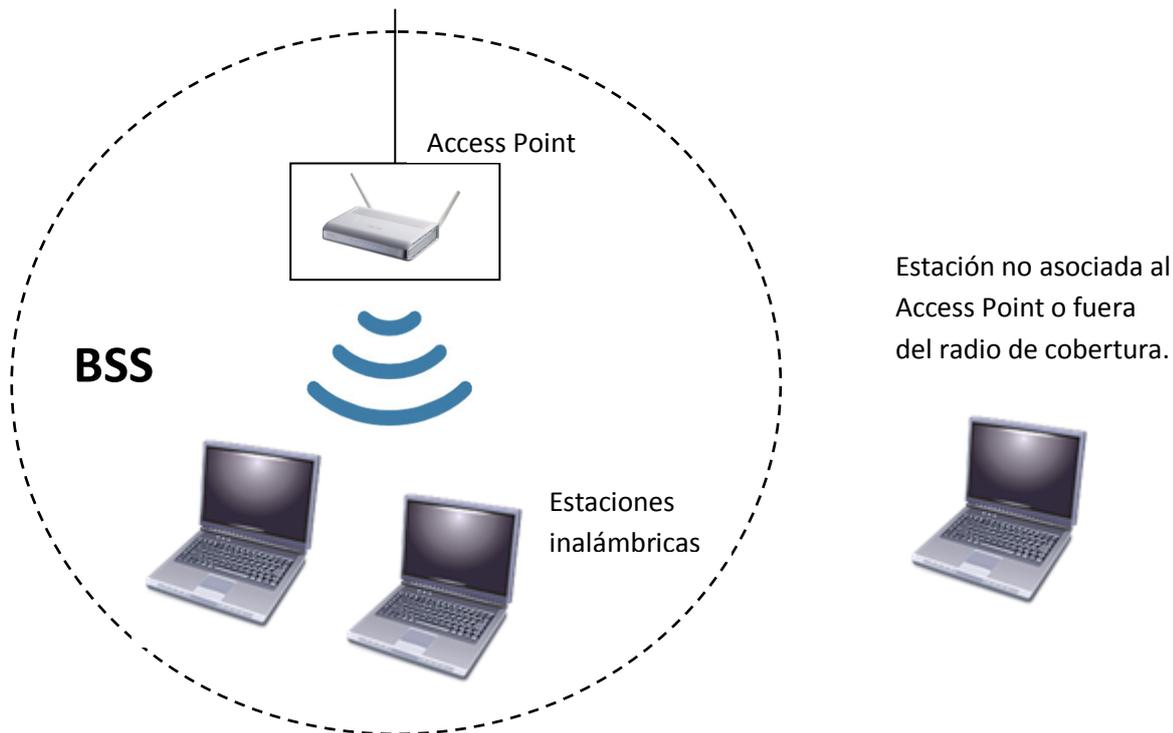
2.1.1 Configuración con Punto de Acceso (AP)

También se conoce como el modo de infraestructura. Esta topología utiliza el concepto de celda, que es el área en el que una señal radioeléctrica es efectiva, y ya utilizado en otras comunicaciones inalámbricas, como la telefonía móvil.

Se denomina **Basic Service Set (BSS)** a aquel conjunto que normalmente contiene una o más estaciones inalámbricas y una estación base central, conocida como **Access Point (AP)**. Se trata de estaciones sin hilos que pueden ser fijas o móviles, y se comunican con la estación base central con el protocolo MAC IEEE 802.11.



Ilustración 2 – Basic Service Set (BSS)

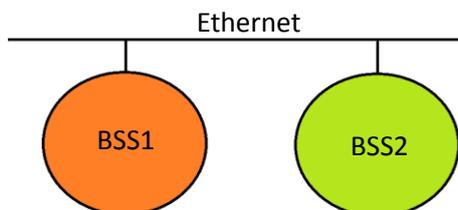


Entre los parámetros que definen una red WLAN, destacan el **BSSID (BSS Identifier)** se trata de la dirección MAC (*Media Access Control*) del Punto de Acceso al que nos conectamos, y el **ESSID (Extended Service Set ID)** que es el nombre identificable de la red.

Este modo de funcionamiento presenta una eficiencia superior a la red ad hoc, ya que se gestiona y transporta cada paquete de información en su destino, mejorando la velocidad del conjunto. En este modo de funcionamiento, la tarjeta de red se configura automáticamente para utilizar el mismo canal radio que utiliza el punto de acceso más próximo de la red.

Varios AP se pueden conectar entre sí (por ejemplo, utilizando una Ethernet cableada u otro canal sin hilos) y formar lo que se denomina un **Sistema de Distribución (DS)**. En este caso, el sistema DS aparece en las capas superiores (por ejemplo, en el nivel IP) como una red 802.

Ilustración 3 – Sistema de Distribución



Además, como en las redes inalámbricas las celdas suelen tener un tamaño reducido, mediante el uso de varias fuentes de emisión es posible combinar varias celas para cubrir un área más extensa. En este caso, los Puntos de Acceso funcionarían como repetidores, y por tanto aumentarían el alcance de una red inalámbrica (Roaming).

2.1.2 Configuración Peer-to-Peer

Las estaciones también pueden formar una BSS o un grupo de estaciones entre sí, de igual a igual (peer to peer) sin control central, y se dice que funcionan en forma de red ad hoc. Esto se utiliza en general con estaciones que se encuentran de manera casual y que desean comunicarse. Es la configuración más sencilla puesto que sólo hacen falta dos equipos con su correspondiente adaptador inalámbrico.

Ilustración 4 – Configuración Peer-to-peer



En este tipo de redes, el único requisito deriva del rango de cobertura de la señal, ya que es necesario que los terminales móviles estén dentro de este rango para que la comunicación sea posible. Los terminales de esta red Wi-Fi que quieran comunicarse entre sí tienen que utilizar el mismo canal radio y configurar un identificador específico de Wi-Fi (ESSID) en modo ad hoc. Las configuraciones ad hoc son comunicaciones de tipo punto a punto, muy sencillas de implementar y no es necesario ningún tipo de gestión administrativa de la red.

2.1.3 Configuración de Interconexión de Redes.

En una red en modo infraestructura, los puntos de acceso pueden trabajar como interconexión entre dos redes separadas, mediante el uso de antenas (direccionales u omnidireccionales), ampliando así las posibilidades de las redes inalámbricas. De esta forma los recursos disponibles en ambas redes se amplían.

Ilustración 5 – Interconexión de redes



Con esta configuración una LAN no inalámbrica se beneficia de la tecnología inalámbrica para realizar interconexiones con otras redes, que de otra forma serían más costosas, o simplemente imposibles si las condiciones del terreno no son apropiadas.



2.2. IEEE WLAN 802.11

El protocolo IEEE 802.11 es un estándar de comunicaciones del IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) que define la capa física (PHY) y la capa de acceso al medio (MAC) del modelo OSI para una transmisión inalámbrica. La subcapa LLC (Logical Link Layer) está especificada en el IEEE 802.2.

Ilustración 6 – Modelo OSI

	Data	Layer
Host layers	Data	Application Network process to Application
	Data	Presentation Data representation and Encryption
	Data	Session Interhost Communication
	Segments	Transport End-to-end connections and Reliability
Media layers	Packets	Network Path determination and IP (Logical addressing)
	Frames	Data Link MAC and LLC (Physical addressing)
	Bits	Physical Media, Signal and binary transmission.

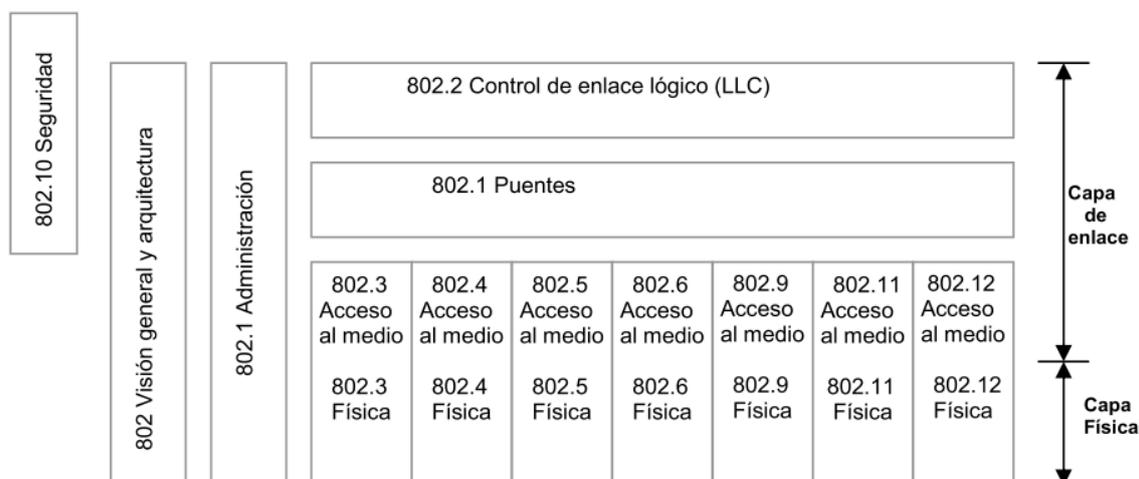
IEEE numera sus estándares según el número del comité o grupo de trabajo, seguido de un punto y el número de serie, que se puede acompañar de cifras que indiquen la versión o revisión. El término Wi-Fi (Wireless Fidelity) hace referencia al conjunto de estándares para redes sin hilo basado en las especificaciones IEEE 802.11x, y fue creado por la Wi-Fi Alliance.

Ilustración 7 – Logotipos IEEE 802.11 y WiFi



Existen diferentes grupos de trabajo dentro de IEEE 802 que trabajan en subestándares del mismo:

Ilustración 8 – Familia 802



El estándar 802.11 original fue publicado en 1997 y actualizado dos años más tarde, dando lugar al IEEE 802.11-1999. Bajo este estándar se permitían unas tasas de transferencia que iban desde 1 Mbps hasta 2 Mbps, trabajando en la banda ISM 2,4 GHz que no precisa licencia.

Como hemos comentado, este estándar nos especifica:

Capa Física (PHY):

- Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS): cambia de frecuencia de una manera pseudoaleatoria (PN) sólo conocida por emisor y receptor.
- Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS): la información se multiplica por una secuencia pseudoaleatoria conocida por emisor y receptor.

Capa de Acceso al Medio (MAC). Métodos de acceso al medio:

- Distributed Coordination Function (DCF). Utiliza un mecanismo de acceso al medio distribuido basado en CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with a Collisions).
- Point Coordination Function (PCF). Utiliza la anterior como base para su funcionamiento. PCF es opcional y usa un mecanismo de polling que requiere de un nodo central llamado PC (Point Coordinator) que lo coordine.

2.3. IEEE WLAN 802.11 PHY

La capa física de cualquier red define la modulación y la señalización características de la transmisión de datos. La capa física IEEE 802.11 utiliza el espectro extendido por secuencia directa que codifica cada bit en una cadena de bits,



denominada código. Esta técnica es muy similar a la utilizada en CDMA, excepto que todas las estaciones móviles (o estaciones base) utilizan el mismo código.

Define dos posibles opciones para la elección de la capa física. Estas técnicas no son interoperables entre sí:

2.3.1. Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)

La tecnología de espectro ensanchado por salto en frecuencia (FHSS) consiste en transmitir una parte de la información en una determinada frecuencia durante un intervalo de tiempo llamada *dwell* inferior a 400 ms. Pasado este tiempo se cambia la frecuencia de emisión y se sigue transmitiendo a otra frecuencia. De esta manera cada tramo de información se va transmitiendo en una frecuencia distinta durante un intervalo muy corto de tiempo. FHSS consiste en enviar cada paquete por un canal distinto dentro de la banda, de esta manera se reducen las posibles interferencias externas.

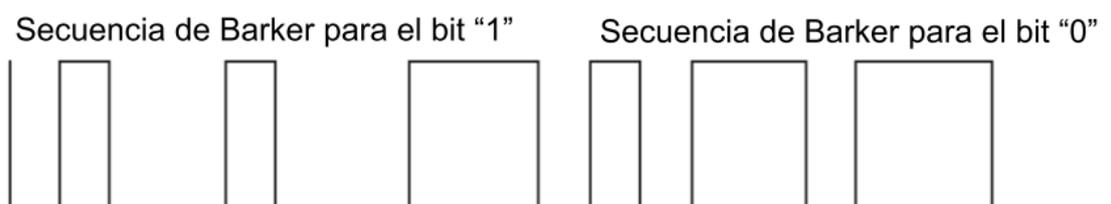
El orden en los saltos en frecuencia se determina según una secuencia pseudoaleatoria almacenada en unas tablas, y que tanto el emisor y el receptor deben conocer. La secuencia de orden se guarda en tablas que conocen tanto el emisor como el receptor. De este modo, la banda de 2,4 GHz se organiza en 79 canales con un ancho de banda de 1 MHz cada uno. El número de órdenes por segundo se regula en cada país. Por ejemplo, en EEUU es de 2,5 órdenes/segundo.

Si se mantiene la sincronización en los saltos de frecuencias se consigue que, aunque en el tiempo se cambie de canal físico, a nivel lógico se mantiene un solo canal por el que se realiza la comunicación. En la capa física que utiliza FHSS, la modulación en la banda de 2,4 GHz utilizada es la FSK (modulación en frecuencia).

2.3.2 Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS):

Sistema de espectro ensanchado de secuencia directa. El DSSS genera un patrón de bits pseudoaleatorio (señal de chip) para cada uno de los bits que forman la señal. Cuanto mayor sea el patrón, más resistentes son los datos a posibles interferencias (de 10 a 100 bits). Esta secuencia es conocida como secuencia de Barker (o código de dispersión). Es una secuencia rápida diseñada para que aparezca aproximadamente la misma cantidad de 1 que de 0:

Ilustración 9 – Secuencia de Barker



La secuencia es equilibrada, es decir, hay aproximadamente la misma cantidad de ceros que de unos. Todas las estaciones conocen la secuencia utilizada. Esta secuencia proporciona una ganancia de procesamiento (para 10 bits, se obtiene una, y para 100 bits). La ganancia tiene que ser mayor o igual que el SNR (relación señal/ruido).

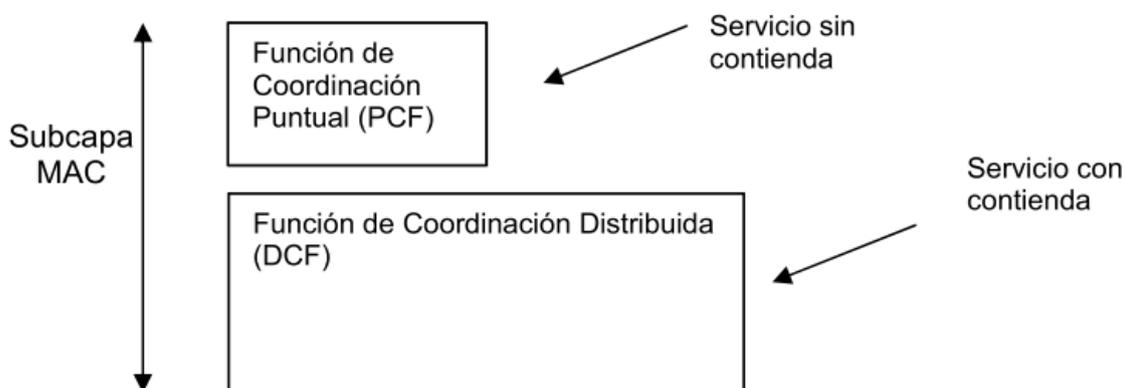
En DSSS, la modulación en la frecuencia 2,4 GHz utiliza variaciones en fase de una sola portadora en amplitud constante: Differential Binary Phase Shift Keying (DBPSK) y Differential Quadrature Phase Shift Keying (DQPSK). En la banda de 5,7 GHz, se utilizan variaciones de frecuencia de múltiples portadoras: Ortogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM).

2.4. IEEE WLAN 802.11 MAC

La capa MAC del IEEE 802.11 asume funciones que en general son asumidas en otros protocolos por las capas superiores, como la fragmentación, la recuperación de errores, el control de la movilidad y la conservación de la potencia. El objetivo es definir un conjunto de protocolos de acceso al medio (MAC) que puedan trabajar independientemente de la capa física (por ejemplo, con el estándar Ethernet 802.3).

La arquitectura de la subcapa MAC definida por el estándar IEEE 802.11 incluye la Función de Coordinación Puntual (Point Coordination Function, PCF) y la Función de Coordinación Distribuida (Distributed Coordination Function, DCF).

Ilustración 10 – Arquitectura de la subcapa MAC



Ambas funciones de acceso al canal coexisten alternativamente utilizando diferentes intervalos de tiempo, mientras que el **CP** (*Contention Period, Periodo de Contención o Contienda*) es utilizado por la función DCF, la función PCF utiliza el **CFP** (*Contention-free Period, Periodo Libre de Contención o de Contienda*). Éste último se iniciará cuando la estación que actúa como coordinadora mande una trama de administración llamada Beacon (Baliza) anunciando el comienzo y la máxima duración del CFP.

Durante el CP todas las estaciones compiten por el medio usando el mecanismo DCF, mientras que durante el CFP, el punto de acceso clasifica las transmisiones hacia o desde determinadas estaciones usando un mecanismo de sondeo. No existe contienda entre las estaciones durante el ciclo CFP.

2.4.1 Función de Coordinación Distribuida (DCF)

Se trata de la función básica de la subcapa MAC e implementada en todas las estaciones de la red 802.11 de forma obligatoria. En este modo de funcionamiento, la decisión de quién puede transmitir durante la contienda se toma entre todas las estaciones que forman la red. DCF trabaja en un esquema “revisar antes de enviar”, basado en **CSMA (Carrier Senses Multiple Access)** para determinar cuando está libre. Así cualquier estación que tenga datos para transmitir debe determinar el estado del canal de transmisión, para poder enviar datos.

Para canales con un tiempo de propagación bajo en comparación con el tiempo de transmisión de una trama, las colisiones se pueden reducir de manera significativa exigiendo que cada nodo activo escuche el canal por si hay alguna trama transmitiéndose por el canal antes de iniciar su propia transmisión (escuchar antes de hablar). En este caso, cuando una estación o nodo está transmitiendo un paquete, todas las otras estaciones de la red detienen su transmisión durante el tiempo en el que se transmite la trama. En definitiva, durante la transmisión de una trama las otras estaciones están en silencio.

En una especificación inalámbrica, la capa física monitoriza el nivel de energía de las ondas de radio en una determinada frecuencia para determinar si una estación ocupa o no el canal (el aire), y envía esta información a su capa MAC.

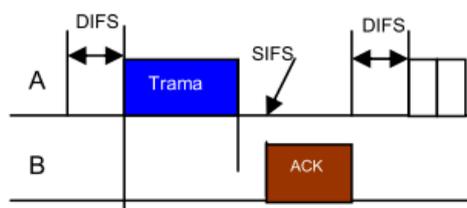
Cuando una estación quiere enviar una trama, primero comprueba el estado del canal. Se pueden dar dos casos:

1. El canal permanece libre durante un intervalo de tiempo llamado **DIFS (DCF InterFrame Space, espacio entre tramas DCF)**. En este caso la estación A obtiene los derechos para comenzar a transmitir.

Finalizada la emisión, la estación debe esperar del destino B la trama **ACK (Acknowledgement, confirmación)** durante un intervalo de tiempo denominado **SIFS (Short Interframe Space, espacio entre tramas pequeño)**. Se tiene que enviar esta trama ACK, ya que, en un entorno abierto como es el aire, el emisor no puede determinar por sí solo si se ha producido una colisión o no.

Si pasado el periodo SIFS, la trama ACK no ha llegado, la estación origen considerará que ha habido un error en la transmisión o que se ha producido una colisión. No obstante, haya sido la recepción correcta o no, la estación origen debe iniciar el algoritmo de **Backoff (Algoritmo de contención o de backoff)**.

Ilustración 11 – Transmisión durante DCF

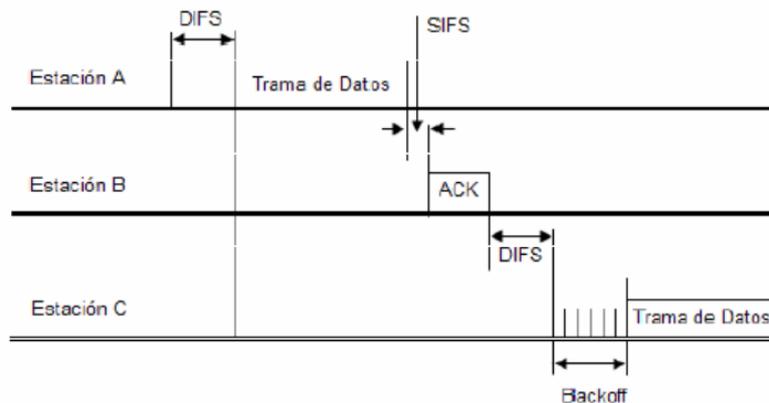


2. El canal está ocupado antes de que termine el periodo DIFS. En este caso la estación deberá ejecutar un algoritmo de backoff, que asignará un número aleatorio de slots de espera. Terminado este tiempo vuelve a escuchar el medio.



Si vuelve a detectar que el canal está libre, entonces espera un tiempo DIFS (en la siguiente imagen, después del ACK) y después la estación calcula un tiempo adicional aleatorio de backoff y empieza a contarlos con un contador hacia atrás mientras el canal esté libre. Cuando el temporizador del backoff aleatorio llega a cero, la estación transmite la trama. El intervalo de tiempo sobre el que el temporizador de backoff calcula el tiempo aleatorio se va duplicando cada vez que una trama transmitida experimenta una colisión.

Ilustración 12 – Periodo de Backoff durante DCF



Debido a las dificultades para detectar las colisiones en un entorno sin hilos, desarrollaron este acceso al medio con la idea de prevenir las colisiones, en lugar de detectar y recuperarlas.

En primer lugar, una trama IEEE 802.11 contiene un campo de duración en el que la estación emisora indica de manera explícita la cantidad de tiempo en el que la trama se estará transmitiendo. Estos valores permiten a las otras estaciones determinar el tiempo mínimo **NAV** (*Network Allocation Vector*) que deben esperar para acceder al medio.

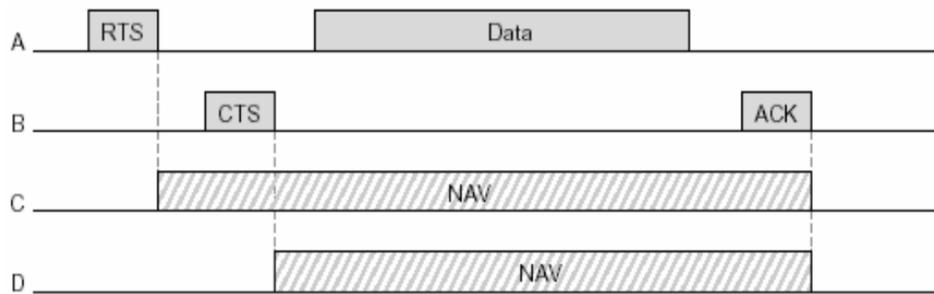
El protocolo también puede utilizar una pequeña trama de control denominada **RTS** (*Request To Send*) y otra denominada **CTS** (*Clear To Send*) para reservar el acceso al canal.

Cuando un emisor quiere enviar una trama, primero envía una RTS al receptor y le indica la duración de la trama de datos en el paquete RTS. El receptor, cuando recibe una trama RTS, le responde con un paquete CTS, y le da al emisor permiso explícito para empezar a transmitir.

Las otras estaciones que escuchan las tramas RTS y CTS saben que tienen que esperar sus respectivas transmisiones para no interferir con esta transmisión. Un emisor y un receptor pueden operar de esta manera, o sin utilizar las tramas RTS/CTS. El uso de RTS/CTS nos proporciona dos ayudas: en primer lugar, la trama CTS, al ser escuchada por todas las estaciones dentro del radio de acción de la estación receptora, ayuda a resolver el problema de los terminales ocultos; y en segundo lugar, puesto que las tramas RTS y CTS son cortas, sólo se producirá una colisión durante la comunicación de RTS y CTS.



Ilustración 13 – RTS/CTS/NAV durante DCF



2.4.2 Función de Coordinación Puntual (PCF)

Este método de acceso usa un punto coordinador que operará en el AP (punto de acceso) de la BSS, para determinar que estación tiene derecho a transmitir en cada momento. Sólo puede usarse en modo infraestructura debido a que está basado en un esquema de polling.

El funcionamiento se basa en polling o sondeo, siendo el AP el que desempeña el papel de “maestro”. El PCF está planteado para alternar periodos libres de contienda (CFP) con periodos de contienda, o dicho de otra manera, DCF y PCF pueden funcionar alternativamente. Al contrario que DCF, es opcional, y los productos 802.11 no están obligados a implementarlo. El proceso sería el siguiente:

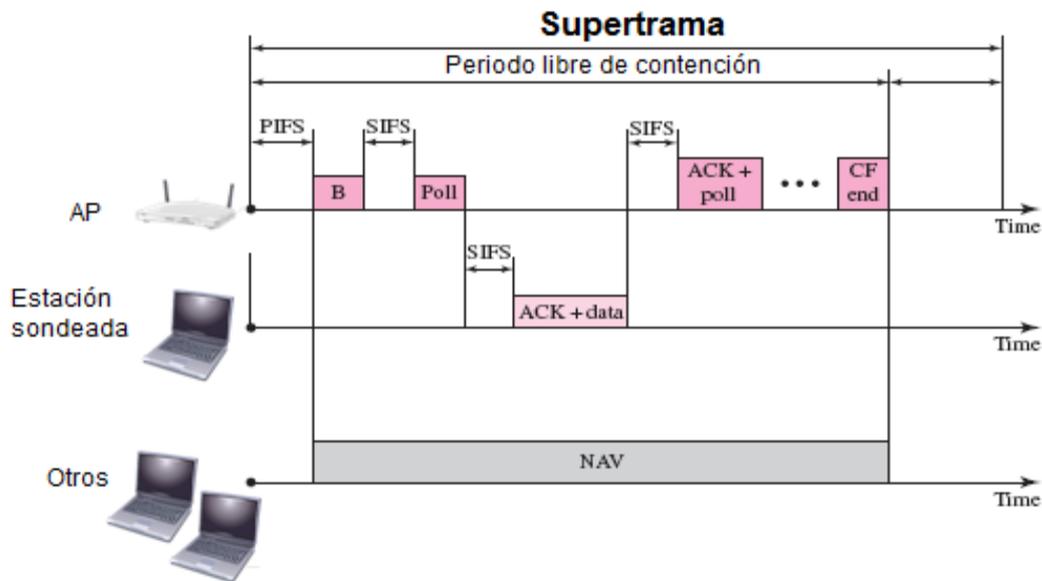
1. Para que una estación inicie una comunicación en una red IEEE 802.11 usando la función PCF, primero tiene que asociarse a la red para que el punto de acceso le reserve recursos y compartan información (SSID, memoria, tasa de transmisión,...).
2. Una vez hecha la asociación, el AP añade la estación a una lista con las estaciones asociadas.
3. Cuando el AP envía una trama **beacon** (*baliza*), se define el inicio del CFP. Estas tramas son generadas en intervalos de tiempo periódicos y conocidos por el resto de estaciones. Uno de los datos aportados por la trama beacon es la duración máxima del período libre de contención, en el parámetro CFPMaDuration.
4. Tras la recepción de la trama beacon, las estaciones tendrán que esperar a que el AP les envíe una trama CF-Poll (trama CF-Poll o de polling, una trama de asignación de turno) antes de poder transmitir. Una STA puede transmitir su información únicamente cuando recibe CF-Poll del AP, en ese momento podrá transmitir una única trama. Cada transmisión en el intervalo libre de contención está separado por un SIFS, para evitar colisiones entre transmisiones.
5. En el caso de que una estación no necesitara transmitir ninguna trama, será sondeada igualmente por el AP. Esta estación mandaría una trama sin datos indicando al AP su situación. Después de esperar un intervalo **PIFS** (*PCF inter frame space, espacio entre tramas PCF*), el PC le enviaría una trama de polling a la siguiente estación de su lista. De esta forma, el PC conserva la prioridad para acceder al medio ya que el intervalo PIFS es inferior al intervalo SIFS. Si



el PC no recibe una respuesta de la segunda estación, espera otro intervalo PIFS y envía una trama de polling a la tercera estación de la lista y así sucesivamente hasta encontrar una estación que quiera transmitir.

6. Por último, además de las tramas de polling y de ACK, el PC también envía tramas de gestión (potencia, sincronización, asociación, etcétera).

Ilustración 14 – Sondeo durante PCF



2.4.3 Tramas IEEE 802.11

Las tramas MAC contienen los componentes básicos siguientes:

- Una cabecera MAC, que contiene campos de control, duración, direccionamiento y control de secuencia.
 - Duración: tramas *Power Save* para dispositivos con limitaciones de potencia, y que contienen el identificador o ID de estación. En el resto, se utiliza para indicar la duración del periodo que ha reservado una estación.
 - Address 1-4: contiene las direcciones de 48 bits en las que se incluyen la estación emisora, la que recibe, la del punto de acceso origen y la del punto de acceso destino.
- Un cuerpo de trama de longitud variable, que contiene información específica del tipo de trama. Varía en función de la trama que se quiere enviar
- Una secuencia checksum que contiene un código de redundancia CRC de 32 bits.



Las tramas MAC se pueden clasificar en tres tipos:

- Tramas de datos.
- Tramas de control: Las tramas de control participan en la entrega de tramas de datos. Administran el acceso al medio inalámbrico y proporcionan funciones de fiabilidad de la capa MAC:
 - **Request to Send (RTS):** Se pueden usar opcionalmente para ganar el control del medio de cara a la transmisión de tramas largas cuando la presencia de nodos ocultos hace especialmente delicada la transmisión de tramas de gran longitud. El servicio RTS/CTS solo lo pueden usar tramas unicast, las de broadcast y multicast simplemente se transmiten.
 - **Clear to Send (CTS):** sirven para responder a las tramas RTS, y también sirven en 802.11g para habilitar el mecanismo de protección para evitar interferir con estaciones no-11g.
 - **Asentimiento (ACK):** permiten asentir positivamente las tramas de datos que lo requieren. La obligatoriedad de asentir todas y cada una de las tramas unicast o fragmentos tiene un importante impacto en el throughput de datos que se puede lograr con 802.11, por lo que en 802.11e se ha relajado este requerimiento, como se verá más adelante
- Tramas de gestión: servicio de asociación, tramas de Beacon o portadoras y tramas TIM o de tráfico pendiente en el punto de acceso.

El formato de una trama MAC genérica tiene la estructura siguiente:

Ilustración 15 – Trama MAC Genérica

Cabecera MAC							Datos	CRC
2 bytes	2 bytes	6 bytes	6 bytes	6 bytes	2 bytes	6 bytes	0 - 2312 bytes	4 bytes
Frame Control	Duration/ ID	Address 1	Address 2	Address 3	Sequence Control	Address 4	Frame Body	FCS

Los campos que componen la trama son los siguientes:

- **Duración:** tramas *Power Save* para dispositivos con limitaciones de potencia, y que contienen el identificador o AID de estación. En el resto, se utiliza para indicar la duración del periodo que ha reservado una estación.
- **Address 1-4:** contiene las direcciones de 48 bits en las que se incluirán la estación emisora, la que recibe, la del punto de acceso origen y la del punto de acceso destino.
- **Cuerpo de la trama:** varía según el tipo de trama que se quiere enviar.
- **FCS:** contiene el checksum



2.5. IEEE WLAN 802.11b

El estándar 802.11b opera en el rango de los 2.4 GHz, con un alcance de 100 metros, y fue lanzado en septiembre de 1999. La capa física del 802.11b es una extensión de la capa física del 802.11 y soporta hasta 11 Mbps o 22 Mbps en su modo extendido. Esta especificación utiliza la técnica denominada Espectro Expandido de Secuencia Directa de Alta Velocidad (High Rate Direct Sequence Spread Spectrum, HR-DSSS)

El estándar 802.11 define trece canales separados 5 MHz en la banda de 2,4 GHz. Un canal 802.11b tiene un ancho de 11 MHz a derecha e izquierda de la frecuencia central (total: 22 MHz). Por lo tanto, en un mismo espacio sólo podremos tener tres canales sin solapamiento.

Según lo anterior, en un misma área podemos tener sin problemas 3 x 11 Mbps, seleccionando los canales 1, 6 y 11 (este último viene por defecto). Con cierto solapamiento podríamos tener cinco canales (1, 4, 7, 10, 13). Observamos que con tres canales podemos hacer una estructura “celular” para que dos BSS con la misma frecuencia no se toquen.

Además este estándar define una tasa dinámica que permite el ajuste automático de la tasa de datos en función de las condiciones de ruido. Eso significa que los dispositivos del IEEE 802.11b transmitirán a velocidades más bajas: 5,5 Mbps, 2Mbps y 1Mbps cuando lo requieran las condiciones de ruido. Cuando los dispositivos se muevan dentro del rango de transmisión de alta velocidad, la conexión se acelerará automáticamente otra vez.

Tabla 2 – Características de los estándares más utilizados IEEE 802.11

Estándar	Año	Tecnología y banda	Velocidad
802.11	1997	Infrarrojo	1 o 2 Mbps
		FHSS 2,4 GHz	
		DSSS 2,4 GHz	
802.11b	1999	DSSS 2,4 GHz	11 Mbps
802.11a	1999	OFDM 5,8 GHz	6-54 Mbps
802.11g	2003	OFDM 2,4 GHz	54 Mbps

Sus inconvenientes son la falta de Calidad de servicio (QoS), la baja tasa de velocidad en comparación a otras tecnologías y la masificación de la frecuencia en la que trabaja (múltiples dispositivos funcionan en los 2.4 GHz y pueden provocar interferencias).

Como principales ventajas cabe destacar el bajo coste de la tecnología, el uso de una banda de frecuencias de uso gratuito y disponible mundialmente, lo que ha convertido al estándar ser el más usado y con mayor aceptación por parte de los usuarios.



2.6. IEEE WLAN 802.11a

Los estándares IEEE 802.11 son una familia de estándares para WiFi que inicialmente solo permitía velocidades de entre 1 y 2 Mbps, que ya no son válidas para los usuarios y que nunca lo han sido para aplicaciones empresariales de gran envergadura. Es la respuesta a las necesidades de alto throughput, entendiendo como throughput el volumen de información que fluye a través de las redes de datos.

La norma 802.11a fue ratificada en 1999 con una modulación QAM-64 y la codificación OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) alcanzando la una tasa de transmisión de 54Mbit/s en la banda de los 5GHz, de uso libre en EEUU pero en Europa es de uso restringido. Esta banda de frecuencias está menos congestionada y por ahora con menos interferencias, pero tiene un alcance limitado a 50 metros, lo que implica tener que montar más puntos de acceso (AP) que si se utilizase 802.11b para cubrir el mismo área, con el coste adicional que ello supone.

El IEEE 802.11a acepta velocidades de hasta 54 Mbps (velocidades reales de aproximadamente 20 Mbps) pero utiliza frecuencias superiores a los 5 Ghz lo que produce incompatibilidades con el 802.11b y 802.11g, aunque es muy util para zonas con mucho ruido y/o interferencias o simplemente para separar el tráfico en zonas saturadas de señal en frecuencias más bajas. Recordemos que la banda de 2.4 GHz se utiliza en múltiples tecnologías (teléfonos inalámbricos, bluetooth,...).

Este estándar utiliza doce canales no solapados, de los cuáles, ocho son para redes de infraestructura y cuatro para conexiones punto a punto. El estándar define estos ocho canales de 25 MHz (pueden convivir diferentes operadores en una misma área). En los 25 MHz, y gracias a OFDM (dividiendo la banda en 64 portadoras ortogonales –en el máximo de una sinc, las otras valen 0–, de las que sólo utilizamos 52) podemos transmitir 54 Mbps.

En las frecuencias autorizadas para uso común, la potencia de emisión (PIRE) en interiores no debe sobrepasar los 200 mW mientras que en exteriores puede llegar hasta 1 watio. En 2,4 GHz hay más interferencias que en 5,8 GHz, sin embargo, cuanto más frecuencia, es necesaria la visión directa. Por este motivo se permite emitir con más potencia a 5,8 GHz.

Tabla 3 – Prestaciones de los estándares más utilizados IEEE 802.11

	802.11b	802.11a	802.11g
Cobertura	✓		✓
Consumo eléctrico	✓		✓
Nº de AP en un área		✓	
Velocidad		✓	✓
Interferencias		✓	
Compatibilidad con 802.11b			✓



Como hemos comentado sus principales inconvenientes son su incompatibilidad con 802.11b y 802.11g (excepto si se dispone de equipos que implementen ambos estándares), que no incorpora mecanismos de calidad de servicio, y que la banda de frecuencias que utiliza no se encuentra disponible en Europa. Sin embargo, actualmente existen diferentes propuestas para lograr mayores velocidades de transmisión, hasta 72 y 108 Mbps utilizando tecnologías de desdoblamiento de la velocidad ofrecidas por algunos fabricantes.

2.7. IEEE WLAN 802.11e

El estándar IEEE 802.11e es una ampliación del estándar 802.11 que define los mecanismos utilizados en una WLAN para proporcionar QoS a aplicaciones en tiempo real como voz y vídeo.

El estándar 802.11e vio la luz a finales de 2005 y fue desarrollado para solventar los problemas que presentaba el 802.11 a la hora de ofrecer calidad de servicio en aplicaciones multimedia, puesto que este último no fue diseñado para diferenciar y priorizar los distintos tipos de tráfico.

En internet existen diversas aplicaciones con diferentes requisitos de calidad de servicio. Por ejemplo, ftp y e-mail necesitan que su transmisión esté libre de errores, mientras que otras aplicaciones más exigentes como VoIP o video en streaming requieren que no haya pérdida de paquetes ni retardo al entregar los datos. IEEE 802.11e fue ideado para soportar esta variación de requisitos en redes WLAN y permite la priorización de flujos de tráfico entre aplicaciones y entre terminales a través de diferentes mecanismos.

Mediante los mecanismos de priorización de tráfico proporcionados por 802.11e, se maximiza el rendimiento de la red de acceso ajustando de forma dinámica los parámetros de acceso de cada cliente en base a la carga de red. Para alcanzar este propósito propone adaptaciones en la capa de acceso al medio que permiten priorizar unas estaciones respecto a otras.

Estas mejoras distinguen entre estaciones con soporte de calidad de servicio **QSTA (QoS Enhanced Station)** y aquellas que no lo soportan **STA**, punto de acceso con soporte de calidad de servicio **QAP (QoS AP)** y sin soporte (**AP**). Dentro de 802.11e podemos distinguir básicamente dos grupos funcionales. Se trataría de las funciones de acceso al canal, y la gestión de especificación de tráfico (TSPEC).

IEEE 802.11, obligaba el envío de tramas ACK para cada trama recibida correctamente. En 802.11e estas tramas han pasado a ser opcionales, lo que implica que la fiabilidad de este tráfico se vería reducida, pero mejora el rendimiento general de la capa MAC para tráfico sensible a retardo, tal como sucede con VoIP donde la información tiene valor durante un periodo de tiempo muy corto.

La opción de trabajar sin ACK igualmente introduce severos requisitos de tiempo real ya que si no es necesario esperar la trama de asentimiento, entonces la siguiente



trama a transmitir debe estar preparada en un tiempo SIFS desde el final de la anterior transmisión. Las mejoras que introduce esta nueva norma consisten en lo siguiente:

- Cada estación tiene ocho colas para ordenar su tráfico, en función de la prioridad, y cada cola tendrá una categoría.
- A cada categoría definimos unos **AIFS** (*Arbitration Inter Frame Space, espacio entre tramas arbitrario*), intervalo mínimo desde que el medio físico se detecta como vacío hasta que se comienza la transmisión. Si el AIFS es grande, eso quiere decir que la prioridad es pequeña. AIFS sustituye al intervalo de tiempo DIFS, tomando un valor diferente para cada AC para que tras éste, cada AC empiece su proceso de backoff.
- Cada categoría dispone de unas **CW** (*Content Windows, ventanas de backoff o de contención*), que son el número de ranuras de tiempo calculado para el mecanismo de backoff de una estación antes de acceder al medio (CW_{mín}) y el valor máximo que puede tomar la ventana de contienda antes de ser descartado un paquete (CW_{máx}).
- Cuando una estación accede al canal, puede transmitir varios paquetes consecutivos durante un tiempo **TXOP** (*transmission opportunities*). Cada cola tiene su TXOP límite. Si el período TXOP se obtiene usando el acceso al canal basado en contención, entonces se denomina EDCA-TXOP. Si, por el contrario, se obtiene a través de HCCA se llama HCCA-TXOP
- Define el **HCF** (*Hybrid Coordination Function*) de manera que, si alternamos DCF y PCF, en el DCF el punto de acceso puede poner información en el momento que quiera.

Estos parámetros influyen directamente en la calidad de la información recibida, afectando al caudal máximo que se puede cursar, al retardo de los paquetes y al jitter, de distinta manera de acuerdo al valor que se les asigne.

2.6.1 Calidad de Servicio (QoS)

A lo largo de todo este trabajo hablaremos de QoS (Quality of Service) o Calidad de Servicio. Podemos definir la calidad de servicio como el conjunto de requisitos que ha de tener un determinado flujo de datos para describir la calidad de una conexión.

Las principales características de un flujo de datos son éstas:

- ✓ Fiabilidad en la transmisión, y que no haya pérdidas de paquetes.
- ✓ Retraso en la transmisión.
- ✓ Distorsión debida a la variación del retraso en un mismo flujo.
- ✓ Ancho de banda o velocidad de transmisión.

La calidad de servicio 'juega' con estos conceptos, y cada aplicación puede variar estos parámetros para ofrecer un buen funcionamiento. Por ejemplo la transmisión del correo electrónico necesita más fiabilidad que la telefonía convencional, pero es más tolerante al retraso de los paquetes; o la transferencia



de archivos, que permite más retraso que cualquier aplicación en tiempo real. A pesar de la diferencia en el retraso, ambas ofrecen QoS.

Los principales problemas en cuanto a la calidad del servicio de una red de VoIP, son la latencia, el jitter la pérdida de paquetes y el Eco. En VoIP estos problemas pueden ser resueltos mediante diversas técnicas que se explican en los siguientes apartados. Para proporcionar soporte QoS, en IEEE 802.11e se introduce una tercera función de coordinación, llamada HCF (Hybrid Coordination Function) que incorpora dos nuevos mecanismos de acceso al canal: EDCA y HCCA.

2.6.2 Hybrid Coordination Function (HCF)

Modo de Coordinación Híbrido que se usa en el estándar 802.11 para combinar los modos centralizado y distribuido. La principal característica de HCF es la definición de cuatro **AC** (*Access category, categorías de acceso*) y de ocho **TC** (*traffic category, categoría de tráfico*) a nivel MAC. Cuando un paquete procedente de las capas superiores llega a la capa MAC, es etiquetado con un identificador de prioridad de usuario (TID) acorde con sus necesidades de QoS, para su posterior procesamiento.

La función HCF define dos modos de operación:

- **EDCA** (*Enhanced Distributed Channel Access, Acceso a canal distribuido mejorado*) que consiste en una función de acceso al canal basada en contienda, la cual funciona de forma concurrente junto al segundo modo de operación llamado,
- **HCCA** (*HCF Controlled Channel Access, Acceso a canal controlado por HCF*) que se basa en un mecanismo de sondeo controlado por el HC (*Hybrid Coordinator, coordinador híbrido*). Este punto coordinador se encuentra situado junto al QAP

2.6.3 EDCA (Enhanced Distributed Channel Access)

EDCA es un nuevo mecanismo de acceso que mejora el original DCF para proporcionar soporte de calidad de servicio basado en priorización de tráfico.

Esta priorización se basa en la asignación de las categorías de acceso definidas por el HCF, las cuales permiten el envío de tráfico asociado a las prioridades de usuario del estándar IEEE 802.1d. En la siguiente tabla podemos ver el mapeo entre la prioridad de usuario de dicho estándar con las categorías de acceso del 802.11e:

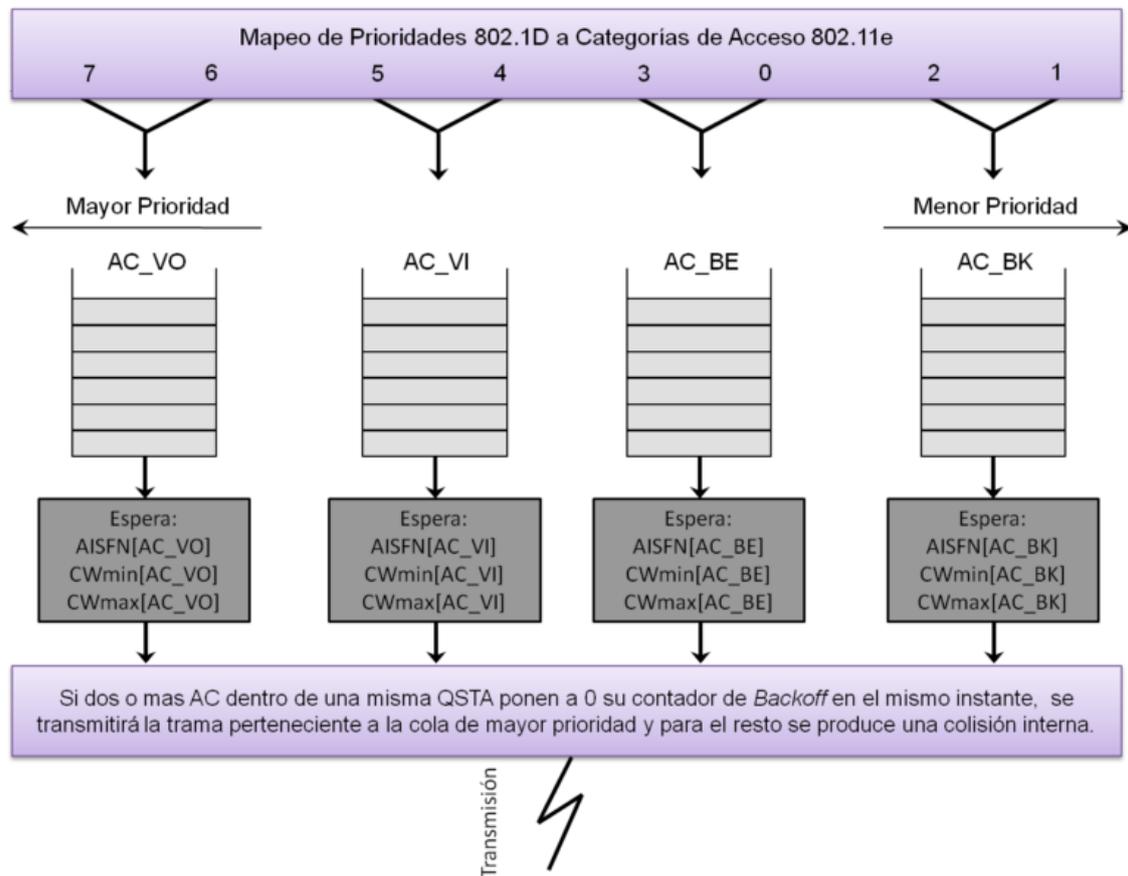


Tabla 4 – Mapeo prioridad 802.11d – Categoría de acceso 802.11e

Prioridad	Prioridad 802.11d	Descripción 802.11d	Categoría de acceso (AC) 802.11e	Descripción 802.11e
Menor	1	Background	AC_BK – AC[0]	Best Effort
...	2	-	AC_BK – AC[0]	Best Effort
...	0	Best Effort	AC_BE – AC[1]	Best Effort
...	3	Excellent Effort	AC_BE – AC[1]	Prueba Video
...	4	Carga Controlada	AC_VI – AC[2]	Video
...	5	Video	AC_VI – AC[2]	Video
...	6	Voz, video	AC_VO – AC[3]	Voz
Mayor	7	Señalización Red	AC_VO – AC[3]	Voz

Cada categoría de acceso tiene su propia cola de transmisión, caracterizada por el ajuste de los parámetros de acceso. La priorización entre las diferentes AC se consigue configurando adecuadamente los parámetros de cada cola de acceso (AIFS, CW y TXOP). La duración del período EDCA-TXOP se controla a través del QAP y se transmite al resto de QSTAs en las tramas beacon junto con otros parámetros relacionados con EDCA. El esquema del funcionamiento de AC sería el siguiente:

Ilustración 16 – Esquema del funcionamiento EDCA



Las estaciones inalámbricas acceden al medio físico en desigualdad de condiciones de acuerdo a la categoría de acceso (AC) que se le asigne de entre cuatro posibles. Así, las QSTA pertenecientes a la categoría con mayor prioridad esperan, de media,



un número menor de ranuras de tiempo, y cuando consiguen ganar el acceso al medio, pueden mantenerlo ocupado un mayor periodo de tiempo.

Dos o más AC dentro de una misma QSTA pueden poner a 0 su contador de Backoff en el mismo instante. Si esto ocurre, ambos flujos intentarán mandar los datos produciéndose una colisión, que en el estándar han denominado colisión interna. Siempre que esto se produzca, la capa MAC ofrecerá la oportunidad de transmisión al flujo más prioritario, tratando el de menor prioridad igual que si se hubiera producido una colisión real.

El mecanismo de espera es similar al de DCF, excepto que en DCF el backoff y tiempos de espera eran fijos, mientras que en 802.11e estos son variables, y se configuran adecuadamente según su AC correspondiente.

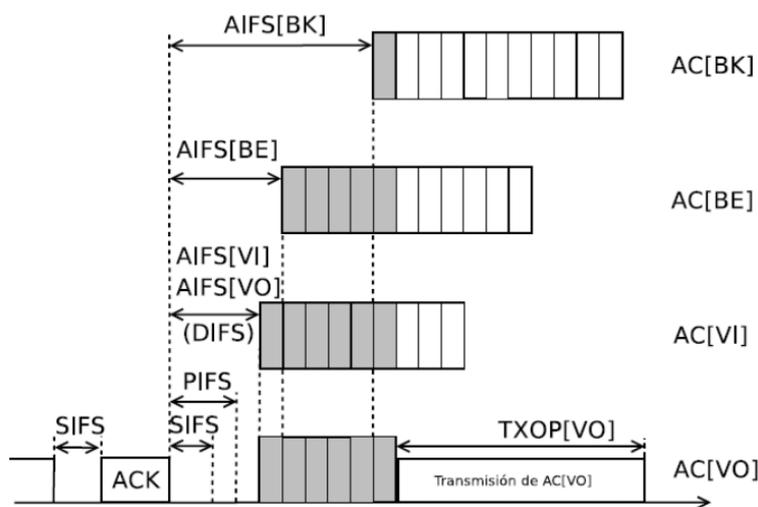
Una estación que quiera el canal para transmitir tiene que esperar hasta que el canal esté vacío durante un periodo de tiempo AIFS definido por:

Ecuación 1 – Cálculo de AIFS en EDCA

$$AIFS[AC] = SIFS \cdot AISFN[AC] \cdot slot_time$$

Donde slot_time es el tamaño de slot en el proceso de backoff y AISFN[AC] (*Arbitration InterFrame Space Number, número arbitrario para el espacio entre tramas*), es utilizado para la diferenciación entre las distintas AC. En la siguiente imagen podemos ver la variación de AIFS en función de su AC:

Ilustración 17 – Diferentes AIFS en EDCA



Si el canal está ocupado, la QSTA deberá activar su mecanismo de contienda, y deberá esperar una ventana de contienda calculada siguiendo una variable uniformemente distribuida escogida en el rango [0; CWmin - 1] para la categoría de acceso. Con esto, el estándar pretende asignar menores tiempos de espera a las estaciones más prioritarias cuando estas tengan que efectuar el mecanismo de Backoff. Estos tamaños se obtendrán mediante la asignación de distintos tamaños límite de ventana CWmin y CWmax en función de su AC.



El estándar define los siguientes tiempos de espera (en microsegundos):

Tabla 5 – Tiempos (μ s) de espera en IEEE 802.11

Estándar	SIFS	PIFS	DIFS	Ranura
802.11	10	30	50	20
802.11b	10	30	50	20
802.11a	16	25	34	9
802.11g	10	19 / 30*	28 / 50*	9 / 20*
802.11e	28	78	128	¿

* Si tenemos estaciones tipo 802.11b (b y g son compatibles).

Finalmente, si la transmisión es exitosa, la estación puede continuar enviando paquetes durante un límite de tiempo acotado por el parámetro TXOP[AC]. Este parámetro limita el tiempo en el que una estación tiene los derechos para transmitir, sin que el resto de estaciones le disputen el canal. Cuando el TXOP[AC] = 0, quiere decir la estación podrá transmitir una sola trama cuando gane el acceso al canal.

Pese a las ventajas que ofrece, sin embargo, presenta el mismo throughput asimétrico que DCF, dando ventaja a la transmisión ascendente a medida que el número de terminales aumenta. Esto es porque el tráfico agregado descendente enviado por el AP debe competir por los recursos en similares condiciones que todos los terminales que quieran transmitir en dirección ascendente.

2.6.4 HCCA (HCF Controlled Channel Access)

HCCA es un mecanismo de acceso al canal que utiliza un HC (Coordinador Híbrido) ubicado en el QAP; el cual se encarga de encuestar las QSTAs periódicamente (polling) para luego darles acceso al medio sin necesidad de competir por éste.

Normalmente el HC se encuentra en el QAP y puede tomar el control del medio cuando la función lo requiere. De esta forma, el planificador puede asignar las TXOPs a los flujos de tráfico en el momento en que éste decida.

Este mecanismo se asemeja mucho al PCF; sin embargo, HCCA incluye algunas mejoras importantes que lo distinguen:

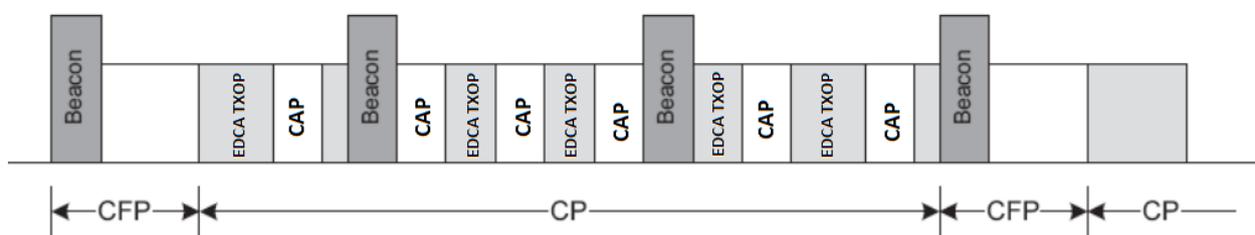
- HCCA, a través del HC, puede encuestar a las QSTAs tanto durante los periodos de CP (en los CAP) y CFP, reduciendo de manera importante el retardo, ya que una estación es encuestada con mayor frecuencia que si sólo lo fuese en el CFP. HCF es más flexible que PCF porque los CAPs pueden suceder en cualquier momento durante la súper trama. Debido a la mayor flexibilidad en la distribución de CAPs, HCF presenta menores retrasos de transmisión con el aumento de la duración de la súper trama
- Cuando una estación es encuestada, se le concede un TXOP durante el cual puede transmitir múltiples tramas; a diferencia de PCF en la que se transmite una sola trama la encuesta una estación.



Se denomina CAP (Periodos de Acceso Controlado) al período en el que HCF accede al canal en un CP. Consiste en uno o más TXOPs, durante los cuales el punto de acceso puede transmitir SDUs que pertenecen a un flujo descendente o enviar un mensaje de polling a una o más estaciones, especificando el tiempo máximo durante el que pueden ocupar el medio.

Un QAP permite iniciar CAPs usando HCCA, después de detectar el medio libre durante un intervalo de tiempo PIFS, que es inferior que un espacio entre tramas DIFS. Por tanto, tiene prioridad sobre el tráfico DCF. Además, el intervalo PIFS es inferior que cualquier espacio entre tramas AIFS, lo que implica que tiene prioridad sobre EDCA para acceder al medio:

Ilustración 18 – CAP durante CP en modo HCCA



De esta forma, HCF puede comenzar el acceso al canal en los intervalos CFP y CP indistintamente, mientras que PCF sólo podía acceder al canal en el intervalo libre de contención

En el estándar IEEE 802.11 el tiempo que una estación puede estar enviando tramas no está limitado. En HCCA es diferente, ya que el HC indica a cada estación la duración máxima de la TXOP. Esto hace posible que el retardo máximo esté acotado, a diferencia de PCF donde esto no sucedía.

Durante una TXOP, sólo una QSTA accede al medio. Hay dos tipos de HCCA-TXOP dependiendo del tipo de flujo (flujo ascendente y flujo descendente):

- Una TXOP descendente para la transmisión desde un QAP a una QSTA.
- Una TXOP ascendente para la transmisión desde una QSTA a un QAP. Éste se inicia cuando un QAP le envía un mensaje de polling a una determinada QSTA. Este mensaje le indica a la QSTA que puede acceder al medio durante un tiempo limitado.

Si un flujo de tráfico de una determinada QSTA recibe un mensaje de polling pero no tiene tramas para transmitir, la QSTA envía una trama de respuesta al QAP indicándole esta situación y el QAP mandará un mensaje de polling a la siguiente estación registrada. El mismo intercambio de mensajes se produce cuando una QSTA determina que el tiempo que tiene disponible en su TXOP es insuficiente para poder transmitir el próximo paquete de su cola.

El estándar IEEE 802.11e introduce una serie de nuevos subtipos de tramas de datos para el soporte de calidad de servicio. Para HCCA-TXOP la trama QoS CF-Poll se usa



para garantizar el intervalo TXOP, y entonces comienza la transferencia de datos usando tramas de datos QoS.

Las tramas QoS-Null pueden ser utilizadas para terminar el periodo HCCA-TXOP si la estación no tiene datos que enviar. La gran variedad de tipos de tramas de datos QoS y las reglas de uso asociadas logran aumentar la eficiencia de la capa MAC 802.11e, aunque también aumenta la complejidad del clasificador HCCA.

Igual que la supertrama IEEE 802.11, una supertrama IEEE 802.11e consiste en dos periodos:

1. Período Libre de Contención: período de la supertrama en la que el acceso al medio es indicado por el HC. Las estaciones sólo aceptan o rechazan las peticiones de transmisión. El inicio de éste período se indica en las tramas QoS CF-Poll y finaliza en el tiempo anunciado en la trama beacon. También puede terminar por el envío de una trama CF-End del HC.
2. Período de contención: período de la supertrama en la que se usan algoritmos de contención para acceder al canal. El inicio de la TXOP se consigue usando reglas EDCA (tras un periodo AIFS + un intervalo de backoff), o bien cuando la QSTA recibe una trama QoS CF-Poll del HC (en el intervalo HCCA dentro del período de contención).



3. Codificación de la voz para VoIP

3.1. Introducción

La comunicación de voz es analógica, mientras que la red de datos es digital, por este motivo no podemos enviar la voz directamente en una red IP. Para poder hacerlo, tenemos que procesar la voz convirtiendo las ondas analógicas a información digital mediante un codificador-decodificador (**el códec**). Existen muchas maneras de transformar una señal de voz analógica a digital y todas ellas gobernadas por varios estándares. El proceso de la conversión es complejo y la mayoría de las conversiones se basan en la modulación codificada mediante pulsos (PCM) o variaciones.

Después de la operación de codificación, un host que desee enviar paquetes multimedia, concatena un cierto número de paquetes de voz (si usa G.711) o un cierto número de frames (si se usa G.729 o G.723.1) en paquetes de igual tamaño y le añade las cabeceras de los protocolos. La pila de protocolos usada para transportar voz en tiempo real es RTP sobre UCP/IP. Los paquetes de voz son encapsulados con cabeceras RTP, UDP e IP, para poder enviarlos sobre la red, ya sea para multicast o unicast. En el lado de los receptores, los datos son desempaquetados y enviados a un buffer de reproducción que elimina la fluctuación de retardo incurrido por la red de transmisión. Los datos de voz se decodifican y se reconstruye la señal de voz que finalmente se entrega al oyente.

La calidad de las transmisiones de voz a través de redes IP depende de varios factores:

- **Códec:** Algoritmo que convierte la señal de voz análoga en datos digitales para la transmisión de una llamada, interpretado luego por el aparato receptor.
- **Delay:** Retraso sufrido por la transmisión entre usuarios
- **Jitter:** Variaciones del delay
- **Packet Loss:** Paquetes perdidos en la transmisión

En este estudio, veremos cómo afecta la elección del códec en la capacidad de la red, y a su vez, cómo afecta el número de llamadas simultáneas en el Delay total de la red.

Para resolver la demanda de la comunicación por voz en tiempo real, las redes IP deben ofrecer la prioridad al tráfico VoIP para asegurar las transmisiones de voz, ya que, podrán darse cortes de llamadas, déficit de señal u otros inconvenientes.

Haremos un repaso de los principales códecs utilizados en la actualidad y que están definidos por sus respectivas Recomendaciones UIT. El **UIT-T (Sector de Normalización de las Telecomunicaciones)** es el órgano permanente de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) que estudia los aspectos técnicos, de explotación y tarifarios y publica Recomendaciones sobre los mismos, con miras a la normalización de las telecomunicaciones en el plano mundial. Estudiaremos los estándares PCM que utilizamos en el estudio.



Por último, veremos que cada códec proporciona una cierta calidad de voz. La calidad de la voz transmitida es una respuesta subjetiva del oyente, por tanto, necesitamos un punto de referencia común que se use para determinar la calidad del sonido producido por los códecs específicos. Este punto de referencia es la puntuación MOS, que veremos al final de este capítulo.

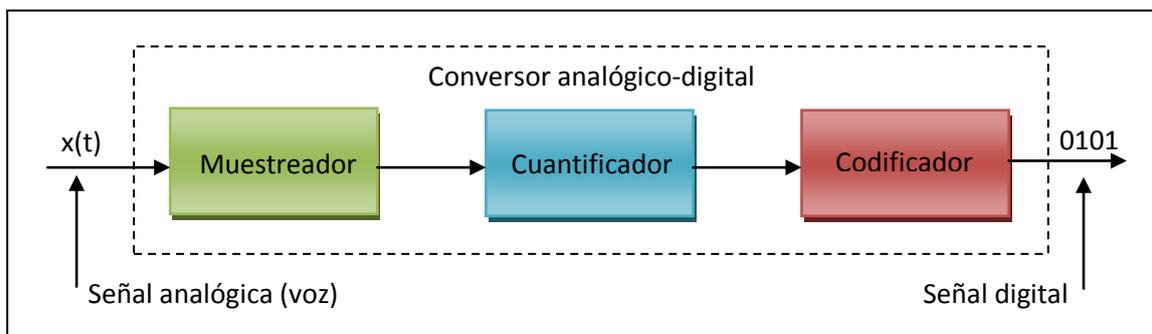
Para el tráfico de voz que vamos a analizar, se ha asumido el uso de fuentes de caudal constante (CBR, Constant Bit Rate) que describiremos a continuación. CBR implica que la tasa de salida del codificador de los datos es constante y es muy útil para flujo de datos multimedia con canales de capacidad limitada.

3.2. Codificación PCM

En 1937, Alex Haley Reeves, un brillante ingeniero británico que trabajaba para la Western Electric Company desarrollo la idea de digitalizar la señal de voz para evitar los ruidos y distorsiones a las que se ven sometidas las comunicaciones analógicas. Así pues, en la década de 1930, Reeves propuso la primera modulación digital propiamente dicha: PCM (Pulse Code Modulation) o Modulación de Pulsos Codificados. No obstante la codificación PCM no se haría popular hasta los años 60, después de la invención del transistor. Actualmente, la mayor parte de los sistemas de comunicaciones existentes se basan en modulaciones digitales.

La idea de la digitalización de las señales consiste en transformar una señal analógica, la voz, a una señal digital mediante un proceso de conversión analógico-digital:

Ilustración 19 – Conversión analógico-digital



En este proceso se realizan las siguientes tareas:

Muestreo:

El proceso de muestreo consiste en tomar valores instantáneos de una señal analógica, a intervalos de tiempo iguales. A los valores instantáneos obtenidos se les llama muestras. El muestreo se efectúa siempre a un ritmo uniforme, que viene dado por la frecuencia de muestreo f_m o sampling rate. La condición que debe cumplir f_m viene dada por el teorema del muestreo "Si una señal contiene únicamente frecuencias inferiores a f , queda completamente determinada por muestras tomadas a una velocidad igual o superior a $2f$."

Cuantificación:

Proceso mediante el cual se asignan valores discretos a cada una de las muestras obtenidas en el proceso e muestreo. Existen varias formas de cuantificación:

- **Cuantificación uniforme:** Se emplean un número finito de valores para representar la amplitud de las muestras. Para ello toda la gama de amplitudes que pueden tomar las muestras se dividen en tiempos iguales y a todas las muestras cuya amplitud cae dentro de un intervalo se les asigna el mismo valor. Este método introduce un error de aproximación en la amplitud de la señal digital necesariamente.
- **Cuantificación no uniforme:** Se toman un número determinado de intervalos y se distribuyen de forma no uniforme aproximándolos en los niveles bajos de señal, y separándolos en los niveles altos. De esta forma, para las señales débiles es como si se utilizase un número muy elevado de niveles de cuantificación, con lo que se produce una disminución de la distorsión. Sin embargo para las señales fuertes se tendrá una situación menos favorable que la correspondiente a una cuantificación uniforme, pero todavía suficientemente buena

En una cuantificación uniforme la distorsión es la misma cualquiera que sea la amplitud de la muestra. Por lo tanto cuanto menor es la amplitud de la señal de entrada mayor es la influencia del error. La situación se hace ya inadmisibles para señales cuya amplitud analógica está cerca de la de un intervalo de cuantificación.

Codificación o compresión

La compresión de tipo PCM se basa en la recogida de muestras de audio a una frecuencia determinada. El valor de cada muestra es un número real arbitrario y se redondea a un determinado valor finito (tenemos un número de valores finitos para las muestras). Cada uno de estos valores se representa con un número finito de bits, que depende del número de valores que pueden tomar las muestras.

Por ejemplo, si se cuenta con 256 posibles valores de muestras, utilizaríamos un byte para representarlas.

Para el caso genérico de PCM, se reúnen 8.000 muestras por segundo y cada muestra se representa con 8 bits. Esto nos da una señal digital con una tasa de 64.000 bits por segundo. La señal digital se puede descodificar y convertir de nuevo en una señal analógica, pero esta señal será diferente de la señal analógica original como consecuencia del muestreo. Si se recogen más muestras y se toman más valores posibles para estas muestras, la señal analógica descodificada será mucho más parecida a la señal original.

El ancho de banda que necesitaremos está directamente relacionado con el Códec que utilicemos. Por ejemplo, como hemos visto, el códec G.711 utiliza 64 Kbps, mientras que los códec que veremos más adelante, G.729 y G.723, necesitan 8 y 6,3 Kbps respectivamente. La sobrecarga (overhead) de paquetes incrementará los respectivos anchos de banda, así que es mejor seleccionar un códec de voz comprimido para reducir este efecto. Por ejemplo, el ancho de banda total requerido incluyendo el encabezado del paquete está cerca de 9.33kbit/s para G723.1 (5.3kbit/s) y cerca de 10.40kbit/s para G723.1 (6.3kbit/s). Para el G.711 la tasa incluyendo el overread sería de unos 84 Kbps. Veremos el efecto de la sobrecarga cuando realicemos el cálculo numérico.



3.3. Recomendación UIT-T G.711

El G.711 es un estándar sin pérdida, es decir, no hay degradación de la calidad con su uso. Para uso común, es el códec que requiere menor cantidad de recursos de DSP (*Digital Signal Processor*) ya que no hay compresión, pero por el contrario consume más ancho de banda (64 kbps por la señal cuando se muestra a 8 kHz). Dado que este es el mismo tamaño que una llamada de voz tradicional analógica (ancho de banda empleado en la red RTC y líneas RDSI) no hay economía de ancho de banda, así que rara vez se utiliza en una red convergente.

La Recomendación UIT-T G.711 define la modulación por impulsos codificados (MIC) de frecuencias vocales aconsejando el empleo de las siguientes características para la codificación de señales de frecuencias vocales:

Velocidad de muestreo

El valor nominal recomendado es de 8000 muestras por segundo con una tolerancia de ± 50 partes por millón (ppm).

Cuantificación:

Para los circuitos internacionales deben utilizarse ocho dígitos binarios por muestra. Esto requiere la aplicación de un código MIC uniforme con 13 (14) bits

Ley de codificación

Se recomiendan dos leyes de codificación, designadas ley A y ley μ . Si se utiliza la ley μ en redes que requieran la supresión de la señal de carácter "todos 0", la señal de carácter correspondiente a valores de entrada negativos comprendidos entre valores de decisión 127 y 128, será 00000010, y el valor a la salida del decodificador será -7519. Al valor de salida del decodificador corresponde el número 125.

- G.711 μ -Law

Sistema de cuantificación logarítmica de una señal de audio. Es utilizado principalmente para el audio de la voz humana y es el más utilizado en EEUU y Japón. La implementación de este sistema consiste en aplicar a la señal de entrada una función logarítmica y una vez procesada, realizar una cuantificación uniforme

- G.711 A-Law

Esta ley también es un sistema de cuantificación logarítmica de señales de audio utilizado en Europa. Basa su funcionamiento en un proceso de compresión y expansión de amplitudes llamado *companding* y posteriormente se aplica una cuantificación uniforme.

3.4. Recomendación UIT-T G.729

El codificador de voz G.729 se basa en una técnica llamada predicción lineal con excitación por código algebraico de estructura conjugada (CS-ACELP, conjugate-structure algebraic-code excited linear-prediction) y genera una salida de 8 Kbps



de velocidad de datos para una tasa de muestreo de entrada de 8 KHz, lo que da una relación de compresión de 16:1.

La motivación principal de este algoritmo es reducir la carga computacional asociada con los procedimientos de búsqueda de código realizados por otras variantes de CELP, utilizando cálculos algebraicos simples. Este códec da como resultado un considerable ahorro en el ancho de banda, en comparación con los algoritmos computacionales CELP convencionales.

La recomendación G.729 de la UIT-T define un algoritmo para una codificación de la voz a 8 Kbps mediante CS-ACELP. Este códec está diseñado para operar con una señal digital obtenida tras efectuar, primero un filtrado con la anchura de banda telefónica (Recomendación G.712) de la señal analógica de entrada, seguido de su muestreo a 8000 Hz y su conversión a una modulación por impulsos codificados (MIC) lineal de 16 bits, para entrar en el codificador.

La salida del decodificador deberá reconvertirse a una señal analógica siguiendo un método similar. Otras características de entrada/salida, como las que se especifican en la Recomendación G.711 para datos MIC de 64 kbit/s, deberán convertirse a MIC lineal de 16 bits antes de codificar, o de MIC lineal de 16 bits al formato apropiado después de decodificar.

El tren de bits del codificador al decodificador se define dentro de esta norma. En su modo de base, el codificador G.729 consta de un codificador de voz mono-velocidad a 8 kbit / s utilizando punto fijo operaciones aritméticas.

Descripción general del codificador/decodificador (códec)

El códec CS-ACELP se basa en el modelo de codificación mediante la predicción lineal con excitación por código (CELP). Opera con tramas vocales de 10 ms correspondientes a 80 muestras a una velocidad de muestreo de 8000 muestras por segundo. En cada trama de 10 ms se analiza la señal vocal para extraer los parámetros del modelo CELP (coeficientes de filtros de predicción lineal, ganancias e índices de las tablas de códigos adaptativos y fijos). Los parámetros en cuestión se codifican y se transmiten.

En el decodificador, dichos parámetros se utilizan para recuperar los parámetros de excitación y del filtro de síntesis. La voz se reconstruye filtrando la excitación a través del filtro de síntesis de corto plazo. El filtro de síntesis de corto plazo se basa en un filtro de predicción lineal (PL) de décimo orden. El filtro de síntesis de largo plazo o de tono se aplica mediante el método de la llamada tabla de códigos adaptativos. Tras calcular la señal vocal reconstruida, ésta se mejora con un post filtrado.

3.5. Recomendación UIT-T G.723.1

Códec de voz de doble velocidad para la transmisión de comunicaciones multimedia a 5,3 y 6,3 Kbps. Esta Recomendación especifica una representación de códec que se puede utilizar para comprimir la voz u otras señales audio componentes de servicios multimedia a velocidad binaria muy baja. Al diseñar este códec, la principal aplicación considerada fue la telefonía visual a velocidad binaria muy baja como parte de la familia general de normas H.324.

Tiene asociadas dos velocidades binarias: 5,3 y 6,3 kbit/s. La velocidad más alta tiene mucha mejor calidad. La velocidad más baja da una buena calidad y proporciona a los



diseñadores de sistema más flexibilidad. Ambas velocidades son una parte obligatoria del codificador y del decodificador.

Se puede conmutar entre ambas velocidades en cualquier frontera de trama de 30 ms. También se puede utilizar el funcionamiento con velocidad variable mediante la transmisión discontinua y el relleno de ruido durante los intervalos sin voz.

El códec se optimizó de forma que represente la voz con gran calidad a las velocidades mencionadas y con una complejidad restringida. La música y otras señales audio no se representan con la misma fidelidad que la voz, pero con este códec se pueden comprimir y descomprimir.

Este códec está diseñado para el funcionamiento con una señal digital obtenida filtrando primero la entrada analógica con la anchura de banda de telefonía (Recomendación G.712), muestreándola luego a 8000 Hz y convirtiéndola a señal MIC lineal de 16 bit para su entrada en el codificador. Habrá que convertir la salida del decodificador a señal analógica mediante medios similares. Otras características entrada/salida, como las especificadas en la Recomendación G.711 para los datos MIC a 64 kbit/s, se convertirán a MIC lineal a 16 bit antes de la codificación o de MIC lineal a 16 bit al formato apropiado después de la decodificación.

En esta Recomendación se define el tren de bits que va del codificador hasta el decodificador. El códec se basa en los principios de la codificación de predicción lineal análisis por síntesis, y trata de hacer mínima una señal de error ponderada perceptualmente.

El codificador funciona con bloques (tramas) de 240 muestras cada uno. Ello equivale a 30 ms a una velocidad de muestreo de 8 kHz. Cada bloque se pasa primero por un filtro paso alto para suprimir la componente continua, y luego se divide en cuatro subtramas de 60 muestras cada una.

Para cada subtrama, se calcula un filtro de códec de predicción lineal (*LPC, linear prediction coder*) de décimo orden utilizando la señal de entrada no procesada. El filtro LPC para la última subtrama se cuantifica con un cuantificador vectorial de división predictiva (*PSVQ, predictive split vector quantizer*).

Los coeficientes LPC no cuantificados se utilizan para construir el filtro de ponderación perceptual de corto plazo, que se utiliza para filtrar toda la trama y obtener la señal de voz ponderada perceptualmente.

Para cada dos subtramas (120 muestras), se calcula el periodo de tono en bucle abierto LOL mediante la señal vocal procesada. Esta estimación del tono se realiza con bloques de 120 muestras. El periodo de tono se busca en la gama de 18 a 142 muestras. A partir de ese punto, la voz se procesa a 60 muestras por subtramas.

3.6. Cuantificación de la calidad de la voz

Una de las características más importantes de los Códecs de voz es la inteligibilidad de la voz conseguida en el destino de la comunicación, es decir, que el mensaje hablado transmitido sea inteligible por el receptor. Esta es una de las finalidades de VoIP y se conoce como calidad de la voz.



En general cuando se mide la calidad de la voz en comunicaciones telefónicas, no se habla de fidelidad del sonido, sino de estos tres parámetros básicos:

- ✓ Calidad de audición: cómo se escucha, si se entiende bien
- ✓ Calidad de la conversación: Cómo se interactúa
- ✓ Calidad de transmisión: Calidad de la red.

Hay muchos métodos para medir la calidad de una llamada de VoIP, pero en general existen dos grandes grupos, de forma objetiva y de forma subjetiva.

3.6.2 Medición objetiva

Estos métodos utilizan el envío de una señal conocida a través de la red, la captan en el otro extremo, y la comparan con la señal enviada. Del análisis de la comparación de ambas señales (enviada y recibida) se obtienen conclusiones y se evalúa la calidad. Ejemplo de estos métodos:

- **PSQM (Perceptual Speech Quality Measurement)**: Desarrollado por el instituto KPN de Holanda, este método está descrito en la recomendación P.861 de la UIT-T
- **PESQ (Perceptual Evaluation of Speech Quality)**. Recomendación P.861 UIT-T
- **PAMS (Perceptual Analysis/Masurement System)**. Este sistema pretende medir el nivel de esfuerzo necesario para comprender el habla. Para realizarlo se realizan distintas comparaciones entre el sonido original y el resultante

3.6.2. Medición Subjetiva:

Dada la complejidad de calificar objetivamente la calidad de la voz humana, por su naturaleza, en una comunicación, se necesita que las personas puntúen la calidad de diferentes muestras sonoras para determinar el nivel de bondad de una comunicación.

MOS (Mean Opinion Score), valoración media de opinión. Es un valor subjetivo donde un gran número de usuarios califican la calidad de sonido con respecto a un códec en particular. El MOS es un valor estadístico donde 5 es excelente y 1 es pobre. Desde un punto de vista práctico, una puntuación MOS de 4 o superior supone una alta calidad de voz.

El valor de MOS real ha sido determinado en un ejercicio estadístico, un gran número de personas escuchando la misma llamada. El sistema MOS está recogido en la recomendación P.800 de la UIT-T y describe una escala de calidad de voz basada en la toma de muestras subjetivas que se realizan con una serie de técnicas llamadas ACR (*Absolute Category Rating*).



Para asegurar en lo posible la objetividad de la medición, esta recomendación incluye una serie de indicaciones relativas a la selección de participantes, el entorno donde se deben realizar las pruebas, explicación de la valoración, análisis de resultado... El gran inconveniente del sistema MOS es el alto coste de su realización, pues se necesitan muchos recursos y personas para que sea llevado a cabo.

Tabla 6 – MOS

MOS	Calidad	Descripción
5	Excelente	Sin distorsión
4	Buena	Nivel de distorsión perceptible pero no molesta
3	Regular	Distorsión perceptible y ligeramente molesta
2	Mediocre	Distorsión molesta
1	Mala	Distorsión muy molesta

El E-model es otro método definido por la UIT-T que proporciona un marco para la estimación de la calidad en tiempo real de la red (por ejemplo retrasos y pérdidas características) y de los factores a nivel de aplicación (por ejemplo los códec de baja tasa de bits). Representa un modelo analítico para la calidad de la voz, detallado en la recomendación G.107 de la UIT-T.

Lo que realmente nos interesa del E-model es que nos dice que la calidad de voz queda representada por un determinado parámetro, el factor R. El resultado del E-model es el cálculo del factor R (cuyo rango se sitúa entre 0 y 100, éste último para el mejor resultado).

R Factor es al igual a MOS, un valor subjetivo de medición de calidad de las llamadas VoIP, este factor es utilizado por Cisco y se calcula de la siguiente manera:

Ecuación 2 – Cálculo del factor R

$$R = R_0 - I_s - I_d - I_e + A$$

Donde:

R₀ es la relación señal-a-ruido (signal-to-noise ratio)

I_s es la degradación por conversión (la degradación que sufre la señal en su conversión a un formato paquetizado para poder transmitirla en una red de paquetes)

I_d representa el retardo.

I_e representa la degradación introducido por los equipos de red. Básicamente este factor depende del códec y de las pérdidas de red.

A representa el margen de seguridad.



La recomendación ITU también nos provee de una fórmula más simplificada para calcular el factor R, aunque obviamente menos precisa que la primera pues supone algunos valores por omisión. Esta fórmula es la siguiente:

Ecuación 3 - Cálculo simplificado del factor R

$$R = 94,2 - I_d - I_e$$

Igualmente, necesitamos conocer los parámetros de retardo y degradación. El parámetro I_d modela los deterioros causados por el retraso de un sentido de la comunicación. La calidad de voz se degrada más rápidamente cuando se este retraso superior a 177,3 ms:

Ecuación 4 – Cálculo del parámetro I_d

$$I_d = 0.024 \cdot d + 0.11 \cdot (d - 177,3) \cdot H(d - 177,3)$$

Donde d es el retraso en un sentido de la comunicación (en milisegundos) y la función H(x) es la función de Heavyside:

Ecuación 5 – Función de Heavyside

$$H(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 0 \\ 1 & \text{si } x > 0 \end{cases}$$

Al analizar la fórmula de I_d notaremos a primera vista que hay un valor de inflexión en los 177,3 milisegundos y a valores mayores que éste la calidad de voz se ve afectada a un ritmo más severo. Esto es un dato interesante ya que nos permite bosquejar una regla empírica y decir que en las comunicaciones siempre deberíamos mantener el retardo de la red aproximadamente por debajo de los 170 milisegundos.

El factor I_e representa la distorsión de la señal de voz original debido a la baja tasa del códec empleado y a la pérdida de paquetes en la red y en el buffer de emisión. La siguiente tabla muestra los valores intrínsecos de este parámetro para cada códec, despreciando la pérdida de paquetes.

Es importante tener en cuenta que los esquemas de codificación como G.723.1 y G.729 logran mayores tasas de compresión a costa de una menor calidad en comparación con G.711, que los hacen menos tolerables a la pérdida de paquetes durante su transmisión (también depende de si se utiliza el LPC).

Tabla 7 – Deterioro intrínseco de cada códec empleado

Códec	Bit Rate (kbps)	I_e
G.711	64	0
G.723.1	6,3	15
G.729	8	10



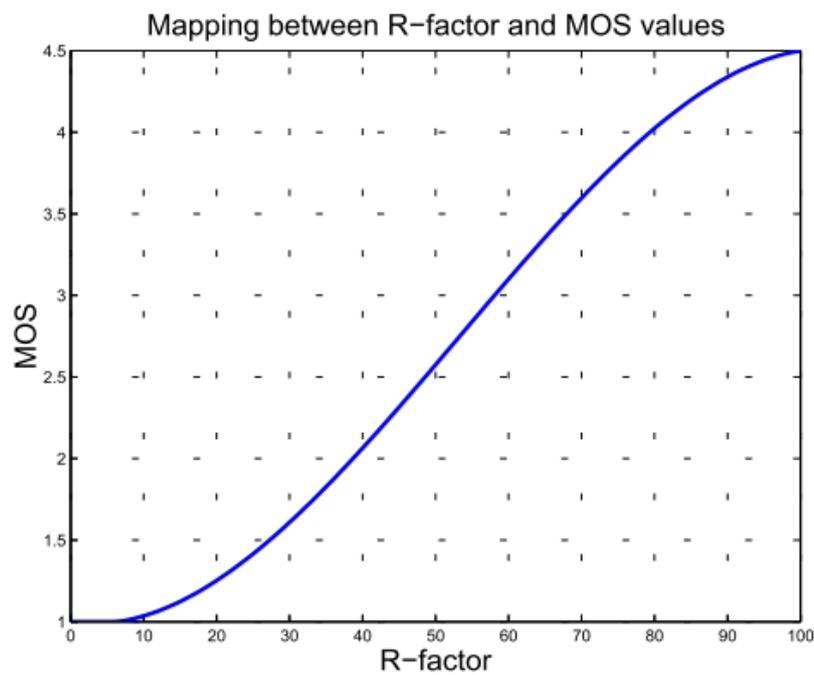
El factor R y MOS están relacionados mediante la siguiente función:

Ecuación 6 - mapeo MOS - factor R

$$MOS = \begin{cases} 1 & \text{para } R < 0 \\ 1 + 0.035R + 7 \cdot R \cdot (R - 60)(100 - R) \cdot 10^{-6} & \text{para } 0 < R < 100 \\ 4,5 & \text{para } R > 100 \end{cases}$$

Esta ecuación se grafica en la siguiente imagen:

Ilustración 20 – correspondencia gráfica MOS - Factor R

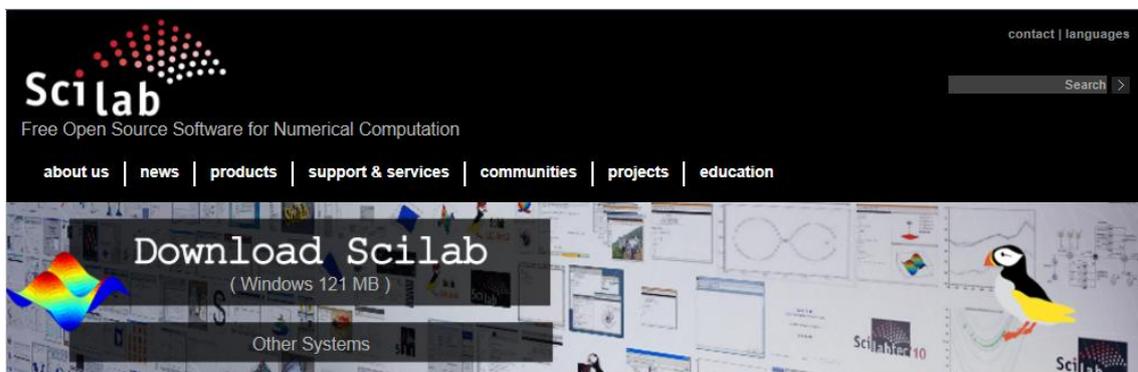


4. Iniciación a Scilab

4.1. Introducción

Scilab es un software libre para cálculo numérico que proporciona un entorno de computación poderoso, para aplicaciones de ingeniería y científicas. Es un software gratuito de lenguaje de programación de alto nivel desarrollado por INRIA (*Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique*) y ENPC (*École Nationale des Ponts et Chaussées*), instituciones de investigación en ciencia y tecnología bajo la supervisión de los ministerios franceses de Investigación y de Economía, Finanzas e Industria.

Ilustración 21 – Web Scilab



Podemos consultar la web y utilizar la ayuda proporcionada en el site para encontrar para información y recursos adicionales:

<http://www.scilab.org/support/documentation>

Y consultar una lista de los libros comerciales y gratuitos, tutoriales en línea y artículos en distintos idiomas que se nos pueden resultar útiles:

http://www.scilab.org/support/documentation/books_papers/books

Con toda esta información haremos un pequeño resumen del software sin ánimo de profundizar mucho en la teoría puesto que no es el objetivo, sino alcanzar los conocimientos necesarios para poder desarrollar y resolver el problema planteado.

4.2. Conociendo la herramienta.

Lo primero que tendremos que hacer será conseguir el software para poder utilizarlo en nuestro equipo. En mi caso, voy a utilizar la distribución para Linux 'Scilab 5.3.3 for 32 bits' aunque también están disponibles diferentes versiones para los sistemas operativos Windows y Mac OS X.

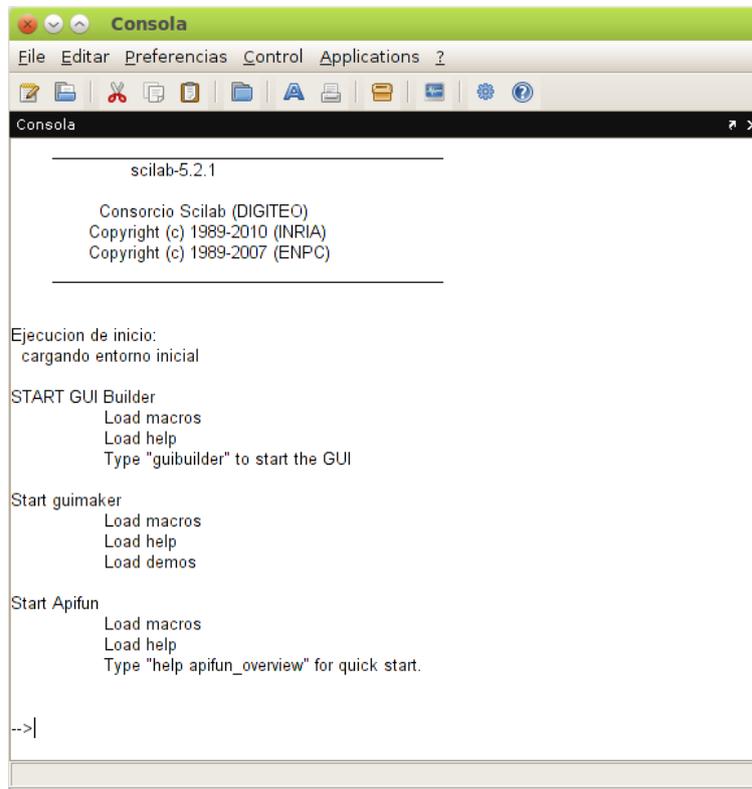


Para ello, desde la web descargamos el ejecutable y lo instalamos en nuestro equipo:

<http://www.scilab.org/products/scilab/download>

Una vez instalado, ejecutamos el acceso directo para ver el aspecto del programa:

Ilustración 22 – Apariencia Scilab



Scilab es un software que funciona por línea de mandos. Una vez abierto, veremos que nos aparece una ventana en blanco con un prompt: "-->", que es donde tenemos que introducir los comandos. Pero ¿Qué quiere decir que funciona por línea de mandos? Pues que si escribimos un comando, el programa nos devuelve la respuesta. Por ejemplo, si escribimos en el prompt:

```
--> Cos (0)
```

Y pulsamos Enter, el programa nos devuelve:

```
ans = 1
```

Que es el valor de $\cos(0)$. Como el resultado de la operación no ha sido asignado a ninguna otra variable, Scilab utiliza un nombre de variable por defecto (ans, de answer), que contiene el resultado de la última operación. La variable ans puede ser utilizada como operando en la siguiente expresión que se introduzca.

En si SCILAB posee tres grandes partes: un intérprete, una librería de funciones y librerías de rutinas Fortran y C.

Scilab trabaja siempre con el tipo de dato 'Real de doble precisión', aunque también tenemos la posibilidad de trabajar con Real de simple precisión, enteros, booleanos, strings, matrices, hipermatrices y estructuras más avanzadas. Entre



algunas de las aplicaciones que podemos manejar tenemos funciones con matrices, herramientas de álgebra lineal, manejo de polinomios, gráficos 2D y 3D, herramientas de procesamiento de señales, etc.

4.3. Sintaxis

Scilab posee su propio lenguaje de programación, orientado al uso de matrices y vectores mediante un lenguaje interpretado. Scilab incorpora su propio editor llamado *SciNotes*, aunque está disponible también *Scipad*. La extensión de estos archivos es *.sce o *.sci.

Una expresión de SCILAB puede tener las dos formas siguientes: primero, asignando su resultado a una variable:

```
-- > variable = expresión
```

y segundo evaluando simplemente el resultado del siguiente modo,

```
-- > expresión
```

en cuyo caso el resultado se asigna automáticamente a una variable interna de SCILAB llamada *ans* (*answer*) que almacena el último resultado obtenido, como comentamos anteriormente. Se considera por defecto que una expresión termina cuando se pulsa *intro*.

Las matrices y vectores son variables del programa cuyos nombres podemos definir, siempre y cuando no utilicemos los caracteres que el programa tiene como caracteres prohibidos. Las matrices se definen por filas; los elementos de una misma fila están separados por blancos o comas, mientras que las filas están separadas por pulsaciones *intro* o por caracteres punto y coma (;). Ejemplo:

```
-- > a=[1 2 1; 3 4 2; 5 3 1]
```

A partir de este momento la matriz *a* está disponible para hacer cualquier tipo de operación con ella. Las matrices se almacenan por columnas (aunque se introduzcan por filas), y teniendo en cuenta esto puede accederse a cualquier elemento de una matriz con un sólo subíndice. Por ejemplo, si *A* es una matriz (3x3) se obtiene el mismo valor escribiendo *a(1,2)* que escribiendo *a(4)*.

Para crear una cadena de caracteres (*string*) podemos hacerlo de estos dos modos:

```
-- > a='cadena de caracteres'
```

```
-- > a="cadena de caracteres"
```

Como se puede observar, cuando realizamos cualquier operación, Scilab nos devuelve inmediatamente el resultado de la misma (si no lo especificamos, nos muestra la variable interna *answer*). Esto puede ser un tanto engorroso cuando la operación que queremos realizar conlleva muchos resultados (por ejemplo con vectores o matrices de 100, 1000...) y puede llegar a saturarnos la pantalla. Para evitar esto, podemos añadir un ";" al final del comando que queremos ejecutar y eso evitara que se muestre por pantalla todo el proceso.

Para realizar la programación, Scilab permite definir macros las funciones, en las que podremos realizar nuestras propias utilidades y reutilizarlas siempre que queramos



con el comando **getf('pathname/archivo.sci', 'c')** . El procedimiento consiste en escribir la función deseada (debe tener extensión .sci), cargarla desde el programa y finalmente ejecutarla. Por ejemplo:

--> edit mifuncion.sci

```
mifuncion.sci
function z = mifuncion(a,b)
    z = a+b;
endfunction
```

--> getf('pathname/mifuncion.sci', 'c'); // Carga de la función

--> k = mifuncion(1,2) // Ejecución de la función

Aunque también sería posible crear un fichero .sci que contenga todo nuestro programa y cargarlo en Scilab mediante el comando **exec(archivo.sci)**.

4.4. Operaciones

Los operadores matriciales que podemos realizar son los siguientes:

Tabla 8 – Operaciones en Scilab

Símbolo	Significado
+	Adicción o suma
-	Sustracción o resta
*	Multiplicación
'	Traspuesta
^	Potenciación
\	División izquierda
/	División derecha
.*	Producto elemento a elemento
./ y .\	División elemento a elemento
.^	Elevar a una potencia elemento a elemento
clear	Elimina todas las variables creadas previamente (excepto las variables globales).
clear a	elimina las variables indicadas

La multiplicación y división elemento a elemento, aunque no tiene demasiado sentido en operaciones con matrices, sí que es muy utilizable en el caso de que la matriz no sea más que un conjunto ordenado de valores.

Podemos definir variables globales para que las funciones tengan acceso a ellas sin necesidad de pasárselas como argumentos, tanto en el programa principal como en las distintas funciones que deben acceder a su valor



4.5. Gráficos

Los operadores Scilab dispone de dos funciones básicas para crear gráficos 2-D. Estas funciones se diferencian principalmente por el tipo de implementación que utilizan en los ejes de abscisas y de ordenadas. Estas funciones son las siguientes:

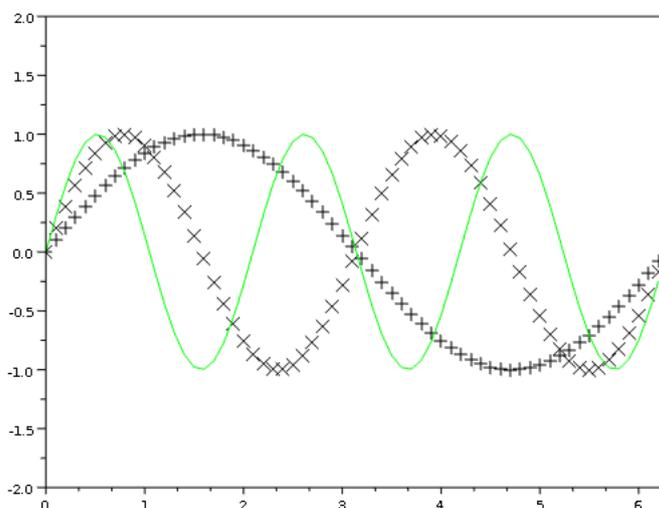
4.5.1. Función plot y plot2d

Crea un gráfico a partir de vectores y/o columnas de matrices, con escalas lineales sobre ambos ejes, está orientado a la compatibilidad con MatLab. La función plot, en sus diversas variantes, no hace otra cosa que dibujar vectores. Permite también dibujar múltiples curvas introduciendo varias parejas de vectores como argumentos. En este caso, cada uno de los segundos vectores se dibuja en ordenadas como función de los valores del primer vector de la pareja, que se representan en abscisas.

Con la función plot2d podemos crear también un gráfico pero su diferencia con la función plot está sobre todo en las propiedades de los ejes, pues podremos definir tanto en el eje X como en el eje Y escala logarítmica y lineal, según las opciones que la opción que le demos.

Existe también la posibilidad de crear gráficos en 3D con la función plot3d.

Ilustración 23 – Ejemplo de la función plot2d



Existen además otras funciones orientadas a añadir títulos al gráfico, a cada uno de los ejes, a dibujar una cuadrícula auxiliar, a introducir texto, etc. Estas funciones son las siguientes:

- `title('título')` añade un título al dibujo
- `legend()` define rótulos para las distintas líneas o ejes utilizados en la figura.
- `xgrid` activa la inclusión de una cuadrícula en el dibujo. Con `xgrid('off')` desaparece la cuadrícula

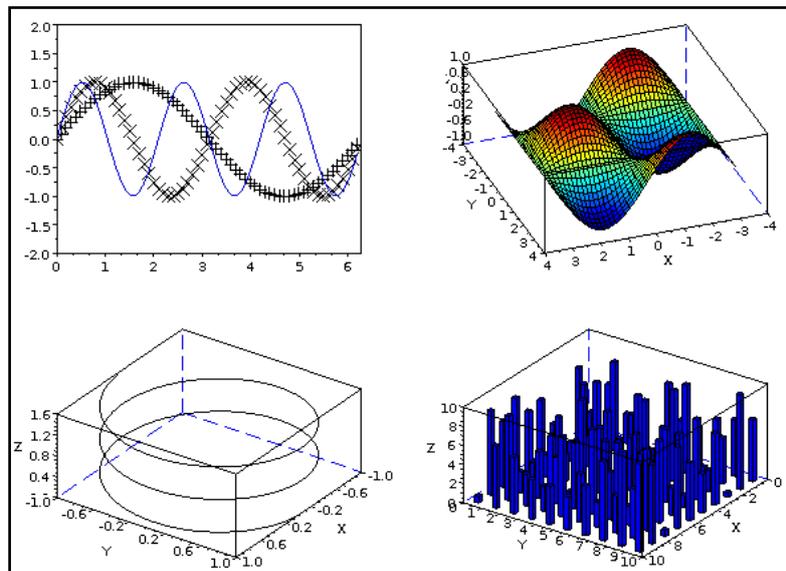


4.5.2. Función subplot

Esta función nos da la posibilidad de dividir una ventana gráfica en m particiones horizontales y n verticales, con objeto de representar múltiples gráficos en ella. Cada una de estas subventanas tiene sus propios ejes, aunque otras propiedades son comunes a toda la figura.

`subplot(m,n,i)` donde m y n son el número de subdivisiones en filas y columnas, e i es la subdivisión que se convierte en activa. Las subdivisiones se numeran consecutivamente empezando por las de la primera fila, siguiendo por las de la segunda, etc.

Ilustración 24 – Ejemplo de la función subplot



4.5.3. Control de los ejes

Scilab dispone de opciones por defecto sobre los ejes, que en determinadas ocasiones nos puede interesar modificar.

El comando `gca` (Get Control Axes) o `get("current_axes")` nos permite recuperar las propiedades de la gráfica para mejorar notablemente sus características. Como usarlo: Después de haber creado una gráfica con una función o modelo determinado es necesario crear una variable e igualarla a `gca()`, para de este modo poder trabajar con las distintas propiedades.

```
my_plot_axes = gca();  
my_plot_axes = get("current_axes")
```

De este modo podemos ajustar los ejes a nuestras necesidades. Por ejemplo, este comando nos permite visualizar los ejes con las coordenadas descritas por los valores mínimos y máximos:

```
my_plot_axes.data_bounds = [0.03,0;0.12,1200];
```



Si no variamos esta propiedad, Scilab trabaja en modo AUTO, es decir ajusta la escala de cada uno de los ejes de modo que varíe entre el mínimo y el máximo valor de los vectores a representar

Con estos otros podemos añadir títulos a la gráfica y modificar el tamaño de la fuente:

```
my_plot_axes.x_label.text      = "Titulo Eje X";  
my_plot_axes.y_label.text      = " Titulo Eje Y";  
my_plot_axes.title.text        = "Titulo general del gráfico"  
my_plot_axes.title.font_size   = 4;
```

Para añadir una leyenda al gráfico, nos podemos servir del siguiente comando después de ejecutar plot:

```
hl=legend(['Texto1';'Texto2';'Texto3'], 2);
```

Donde el número del final corresponde a la posición de la leyenda.



5. Capacidad VoIP en WLAN 802.11

5.1. Introducción.

En poco tiempo, las redes inalámbricas de área local (WLAN) tendrán que soportar un gran número de comunicaciones simultáneas utilizando VoIP, dada la rápida propagación que está teniendo esta tecnología, especialmente en los espacios públicos.

Este hecho motiva el estudio de la capacidad en las redes WLAN que se basen en el estándar IEEE 802.11e transportando VoIP, y poder así encontrar nuevas formas de aumentar esta capacidad, por ejemplo, reduciendo la tasa de los códecs utilizados manteniendo una buena calidad general.

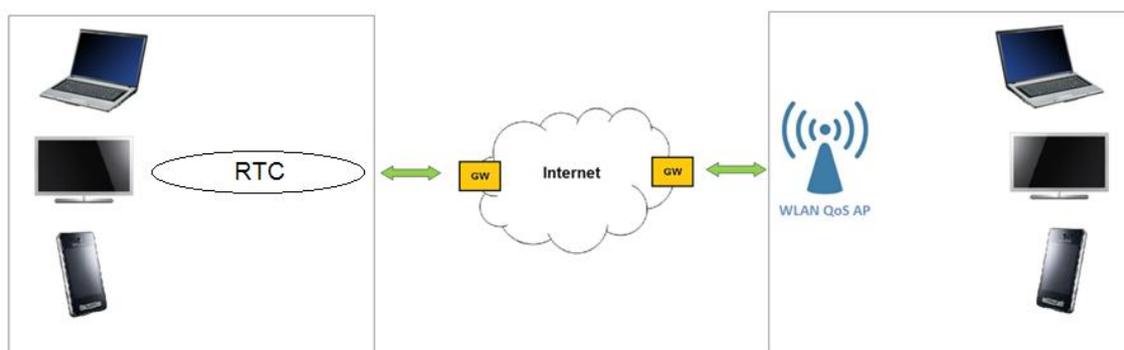
Las WLAN actuales, basadas en el estándar IEEE 802.11b y con un ancho de banda típico de 11 Mbps, sólo podrían soportar un número muy limitado de conexiones VoIP en el modo DCF/PCF. Por ejemplo, según el estudio realizado en el documento [10], la capacidad de una WLAN el códec CBR G.711 en las llamadas y un intervalo de paquetización de 20 ms fue de 12 llamadas, cantidad que no podría ser admitida en una red pública.

En este estudio veremos como la ocurrencia de CAP (Periodos de Acceso Controlado) durante el CP (Periodo de Contención) produce un aumento en la capacidad de las WLAN mientras mantenemos un retardo bajo de la voz. Además compararemos los distintos estándares de la IEEE en WLAN para comprobar la variación de la capacidad en función de las tasas de transferencia. Nos apoyaremos en los diferentes estudios existentes relacionados con nuestro problema, que nos servirán de estímulo en nuestro camino.

5.2. Diseño del sistema estudiado.

Para llevar a cabo el estudio, partiremos de la estructura siguiente:

Ilustración 25 – Sistema estudiado



Donde una puerta de enlace VoIP actúa como la coyuntura de Internet por cable e internet inalámbrico. La puerta de enlace está asociada con un 802.11e QoS AP (QAP). Se necesita un QAP para poder soportar las llamadas VoIP entre redes cableadas e inalámbricas, haciendo las funciones de un HC (*Hybrid Coordinator*).

Se asume que todos los paquetes de VoIP se intercambian a través del QAP. De este modo, tanto para las llamadas VoIP entre dos QSTAs en la WLAN (llamadas dentro del AP) y las llamadas a la red cableada, fuera de la WLAN, el QAP puede analizar en envío y recepción de datos de los extremos de la comunicación.

5.2.1. Limitaciones del estudio.

En el caso de una llamada entre un QSTA y una terminal cableado, consideraremos que el Gateway VoIP se comporta como un extremo inalámbrico pero no tendremos en cuenta el efecto de la red cableada sobre la calidad de las llamadas VoIP, ya que es objeto de estudio en este trabajo.

Otro caso que se podría plantear sería realizar una llamada de voz entre dos QSTAs directamente, es decir una conexión adhoc en la que los extremos se puede comunicar directamente sin necesidad de la intervención del AP, pero este caso tampoco lo estudiaremos puesto que el aseguramiento de la calidad del servicio en este caso sería competencia de la aplicación que permita la comunicación.

El objetivo del estudio es calcular el número máximo de estaciones que podrían comunicarse simultáneamente utilizando el estándar 802.11e. Para obtener el mejor resultado, se tienen que presentar el mejor escenario posible, esto es, sin pérdida de tramas ni colisiones entre estaciones. En VoIP, pérdida de tramas se puede traducir como un 'corte' en la comunicación, lo cual no impacta en el cálculo matemático ya que el paquete se ha enviado, pero puede ser que se haya perdido por la red (internet). Por otro lado, 802.11e no controla la pérdida de paquetes en la transmisión mediante tramas ACK ya que ese mecanismo penaliza la velocidad general, como se ha visto en el estándar 802.11 original.

En el análisis presentado en este artículo vamos a suponer que no se producen colisiones entre las tramas y éstas siempre se reciben sin errores. Así, la posibilidad de aumentos en el periodo de backoff debido a colisiones se omite en este estudio.

5.2.2. Consideraciones del sistema.

Para las llamadas de voz usaremos los códecs que hemos visto en capítulos anteriores. Estos códecs, G.711, G.729 y G.723.1, son los más utilizados hoy en día y poseen distintas cualidades que hacen que nos decantemos por uno o por otro, según la necesidad.

Por ejemplo, la muestra tradicional de la codificación G.711 utiliza PCM para generar muestras de 8 bits cada 0,125 ms, lo que lleva a una velocidad de datos de 64 Kbps. Este ancho de banda puede ser algo elevado para nuestro sistema. Si es el caso, podemos recurrir a los otros códec basados en tramas (por ejemplo, G.729 y G.723.1) que proporcionan una tasa menor.



Debemos tener en cuenta que la reducción del ancho de banda es a costa de una complejidad adicional en el códec y un retardo de codificación así como la calidad ligeramente inferior. Posterior a la operación de codificación, el empaquetador encapsula un cierto número de muestras de voz en el caso de G.711 o un cierto número de tramas para G.729 y G.723.1 en paquetes de tamaños iguales.

Para poder transmitir voz en tiempo real usaremos RTP sobre UDP/IP. Una vez transmitidos los paquetes sobre la red, éstos están sujetos a retardos variables, caídas de la red, pérdidas de paquetes... Estos retrasos pueden ser o no aceptables dependiendo del tipo de llamadas que estemos realizando. Por ejemplo:

- Para las llamadas intracontinentales, el retardo de los paquetes es del orden de 30 ms
- Para llamadas intercontinentales el retraso puede ser de hasta 100 ms, como se demuestra en el artículo [13].

Los códec de voz pueden tolerar una cierta y moderada pérdida de paquetes sin una degradación severa, pero el tráfico de voz tiene un rendimiento inaceptable si se incurre en retrasos, más allá de los comentados. Se ha comprobado que el retardo de extremo a extremo tiene un gran impacto sobre la calidad percibida en conversaciones interactivas con un efecto umbral alrededor de 150 ms [5].

El impacto del retraso en la calidad de comunicación de voz varía significativamente con el tipo de terminal telefónico que estemos utilizando. Por ejemplo, un cierto retraso en una comunicación telefónica no es tan molesto en un teléfono móvil como en un teléfono fijo, por el valor añadido de la movilidad.

Para calificar la calidad percibida de la voz suele utilizar el sistema MOS, que es una media aritmética de las opiniones y va desde la peor puntuación (1) hasta la excelente (5). El modelo-E [4] es un modelo analítico que proporciona un marco para una estimación objetiva de la calidad, basado en las mediciones de rendimiento de la red (por ejemplo, los retrasos y pérdidas) y los factores a nivel de aplicación (por ejemplo, los códec de baja tasa de bits). El resultado del modelo-E es el cálculo del factor R (que va desde el mejor de los casos, 100, al peor caso 0).

El factor R puede ser traducido a la escala MOS:

Tabla 9 – Equivalencia MOS – Factor R

Calidad de la conversación	MOS	R-factor
Best	4.50 – 4.34	100 - 90
High	4.34 – 4.03	90 - 80
Medium	4.03 – 3.60	80 - 70
Low	3.60 – 3.10	70 - 60
Poor	3.10 – 2.58	60 - 50

La calidad de la RTC cae en el intervalo 70 así que R = 70 (MOS = 3,6) será nuestro valor de referencia para la evaluación de la capacidad en este estudio.



5.2.3. Efecto producido por las cabeceras de protocolos.

En computación, podemos entender **overhead** como la sobrecarga producida por un determinado elemento, en este caso la sobrecarga (en tiempo) producida por las cabeceras agregadas a los paquetes de voz cuando atravesamos las distintas capas (protocolos) en la comunicación.

Pongamos un ejemplo: Una red IEEE 802.11b puede soportar tasas de transmisión de hasta 11 Mbps mientras que un códec G.729a, requeriría un ancho de banda de 24 Kbps. Teóricamente, el número de llamadas VoIP soportadas por esta WLAN sería de $11 \text{ Mbps} / (24 \text{ Kbps} \cdot 2)$, lo que daría un resultado de aproximadamente 230 comunicaciones simultáneas, teniendo en cuenta los flujos ascendentes y descendentes.

En la práctica, esa WLAN no podría soportar más de unas pocas comunicaciones VoIP simultáneas. Esto es debido a la adición de cabeceras en los paquetes de voz al atravesar las distintas capas de la pila de protocolos y a la ineficiencia inherente del protocolo MAC de la WLAN.

Una vez que la llamada ha sido establecida, la voz será digitalizada y entonces transmitida a través de la red en tramas IP. Las muestras de voz son primero encapsuladas en RTP y luego en UDP antes de ser transmitidas en una trama IP

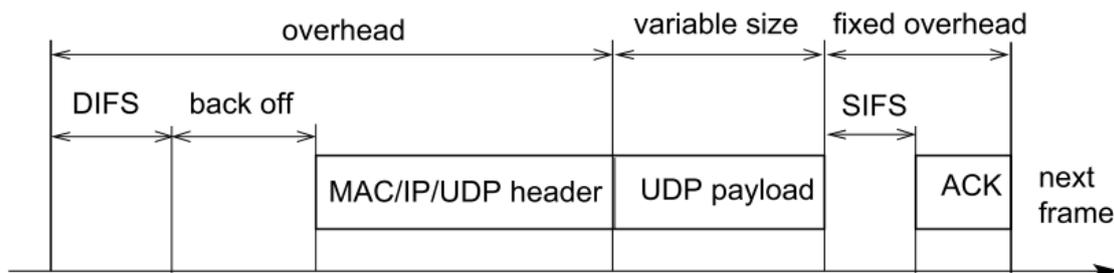
De hecho, un paquete VoIP típico contiene 40 bytes de las cabeceras IP/UDP/RTP y una carga útil de 10 a 20 bytes, dependiendo del códec usado. Por lo tanto, la eficiencia cuando entramos en la capa IP ya es inferior al 50%, considerando una carga útil de 20 bytes. Comparamos:

Tabla 10 – Comparación carga útil vs cabecera

Tiempo en transmitir la carga útil	Tiempo en transmitir la cabecera
$\frac{20\text{bytes} \cdot 8}{11 \text{ Mbps}} = 14,5 \mu\text{s}$	$\frac{40\text{bytes} \cdot 8}{11 \text{ Mbps}} = 29 \mu\text{s}$

Además, la eficiencia es todavía peor cuando entramos en las capas físicas y de acceso al medio del estándar 802.11, puesto que introducen una sobrecarga generalmente mayor de 800 μs (cabeceras MAC, periodos de backoff, ACK, SIFS...)

Ilustración 26 – Sobrecarga en el modo DCF



Tendremos en cuenta el efecto del overhead en nuestro estudio, ya que como se ha demostrado, puede condicionar el tiempo necesario en cada llamada VoIP.



5.3. Mejoras QoS del estándar 802.11e

El estándar IEEE 802.11 original [6] establece dos mecanismos de acceso al canal:

- Una obligatoria basada en contienda (DCF)
- Una opcional de basado en polling (PCF).

DCF ofrece un servicio de best effort y no es capaz de proporcionar la diferenciación y la priorización basada en el tipo de tráfico, mientras que el PCF puede proporcionar un rendimiento satisfactorio en la entrega de tráfico best-effort, aunque le falta el soporte para los requisitos de QoS que plantea el tráfico en tiempo real, y especialmente VoIP el cual tiene requerimientos estrictos de retardo. Estos requerimientos hacen que el esquema DCF una opción no factible para soportar QoS en el tráfico VoIP.

Los estudios realizados transportando VoIP sobre WLAN en modo PCF [12] demostraron que cuando el número de estaciones en un BSS es grande, la sobrecarga de polling es alta y da como resultado un excesivo retraso end-to-end en condiciones de carga elevada.

Así, ni DCF ni PCF presentan funcionalidad suficiente para proporcionar la QoS demandada por las aplicaciones multimedia.

En las redes WLAN, la tasa de error de la capa física es mayor que el de LAN por cable y los problemas del canal inalámbrico hacen que mejorar la tasa de datos de la capa física sea difícil de conseguir. Estas razones han llevado al desarrollo de servicios basados en diferenciación de los esquemas MAC que clasifican el tipo de tráfico en base a sus prioridades relativas.

El estándar IEEE 802.11e [7] aborda las deficiencias del estándar 802.11. Define un conjunto de características compatibles con versiones anteriores con DCF y PCF e introduce el HCF (Hybrid Coordination Function). Como vimos, HCF tiene dos modos de funcionamiento:

- EDCA: Acceso Coordinado Distribuido y mejorado
- HCCA: Acceso al canal controlado HFC

EDCA hereda todos los sistemas de contención y los parámetros del original DCF del estándar 802.11 y proporciona una diferenciación de servicios a través del acceso preferencial para el medio inalámbrico. La priorización se realiza a través de la introducción de cuatro Categorías de Acceso (AC) cada uno con su propia cola de transmisión y un conjunto de parámetros de AC.

La diferenciación en la prioridad entre ACs se realiza mediante el establecimiento de diferentes valores para los parámetros AC que incluye el AIFS y CWmin. Con un ajuste adecuado de estos parámetros, el rendimiento del tráfico multimedia sensible al retraso se puede mejorar. En una red en modo infraestructura, el AP podrá acceder al medio con una prioridad mayor que otras QSTAs.

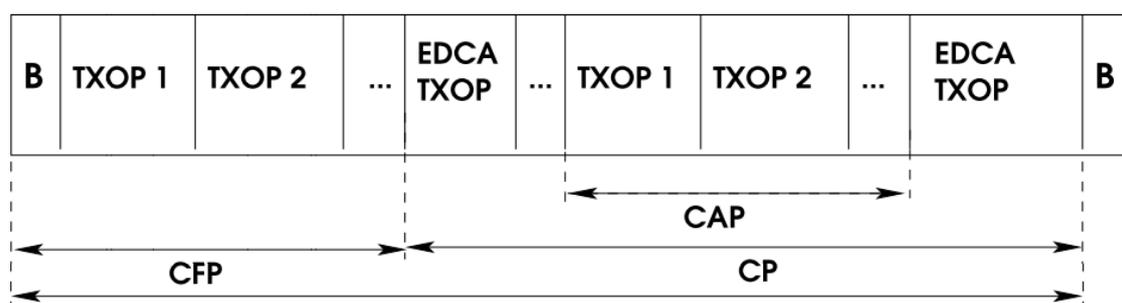
Bajo HCF, la unidad básica de asignación de derecho a transmitir en el medio inalámbrico es la oportunidad de transmisión (TXOP). Cada TXOP se define por un tiempo de inicio y una longitud máxima definida y puede obtenerse ganando una instancia de contención EDCA durante el CP, o recibiendo una trama CF-Poll durante el CP o el CFP.



Con el HCCA, un coordinador híbrido (HC) asigna oportunidades de transmisión (TXOPs) a los equipos móviles por sondeo (también llamado polling), a fin de permitirles una transferencia de datos libres de contención, basándose en políticas QoS. Los QSTAs puede obtener TXOPs utilizando uno o ambos mecanismos de canal de acceso.

Un HC genera una alternancia de la CFP y el CP; la suma de los dos períodos forma la "supertrama" (SF). Además, al contrario que en DCF, los QSTAs pueden ser sondeados durante el CP en períodos llamados períodos de acceso controlados (CAP) como se muestra siguiente imagen:

Ilustración 27 – Súper trama (SF) IEEE 802.11e



La duración de los TXOPs asignados a cada QSTA está determinada por el planificador de HC de acuerdo con los parámetros QoS solicitados. También es posible cambiar la longitud de la SF desde balizas (beacons) que llevan un parámetro que indica la longitud de la SF.

Debido a la diferenciación de servicios, el tráfico en tiempo real llega una prioridad más alta para ganar acceso al canal en 802.11e y, evidentemente, ofrece un mejor rendimiento en comparación con el esquema básico de 802.11.

5.4. Cálculo de la capacidad VoIP en WLAN 802.11e

La capacidad de llamadas VoIP de una red WLAN se define como el número máximo de llamadas bidireccionales que un AP puede soportar mientras mantiene un nivel aceptable de calidad de voz en la transmisión. En este cálculo, usamos el modelo de velocidad de bits constante (CBR) para el tráfico VoIP.

Después de la aceptación de una llamada de voz por el destino de la llamada (estación inalámbrica o puerta de enlace VoIP), el QAP los añade a su lista de polling.

Antes de cualquier transmisión de datos, un flujo de tráfico ha de ser establecido y no se permite a ningún QSTA tener más de 8 flujos de tráfico con diferentes prioridades. Para iniciar un flujo de tráfico, un QSTA envía una petición de QoS que contiene la especificación del tráfico (TSPEC) al QAP.

Para poder aumentar el número de comunicaciones VoIP podremos transmitir tráfico de voz durante los modos HCCA y EDCA. Además asumiremos que todos los datos de voz generados durante el tiempo de polling serán enviados en un paquete con el fin de reducir el efecto del overhead. Así, el número de paquetes generados en

diferentes comunicaciones VoIP que se pueden enviar, durante el intervalo de paquetización, es el número máximo de llamadas.

Con el fin de encontrar el máximo número de estaciones activas que se pueden soportar de forma simultánea en tiempo real, consideramos que el tiempo máximo de polling de las llamadas VoIP es la duración de la SF. Además consideraremos que un QSTA puede obtener un solo TXOP durante la SF.

Esta afirmación se debe satisfacer con el fin de evitar la acumulación en la cola de cada nodo. En el CP, el periodo de acceso controlado (CAP) se pondrá en marcha siempre que el canal se encuentre ocupado en el AP, durante un intervalo de PIFS. Así, la probabilidad de tener una estación con el periodo de paquetización finalizado antes de la llegada de un sondeo del AP es bastante alta en este caso.

Por lo tanto, se consideran dos periodos de polling distintos en nuestro sistema:

- Periodo de sondeo durante el CFP (T_{cfp})
- Periodo de sondeo durante el CP (T_{cp})

y el número total de llamadas VoIP simultaneas sería la suma de las llamadas soportadas en los dos periodos de polling por separado.

El tiempo empleado en la paquetización es el tiempo que se tarda en preparar un paquete de información (carga útil), de la conversación ya codificada y comprimida. Este retardo varía en función del tamaño de bloque requerido por el codificador de voz y el número de bloques de una sola trama.

En RTP, las muestras de voz frecuentemente son acumuladas antes de encapsularlas en una trama para transmisión, para reducir la cantidad de cabeceras (overhead).

La RFC 1890 especifica que el retardo de paquetización por defecto debería ser de 20 ms. Para el códec G.711, esto significa que se encapsulan 160 muestras y serán enviadas como una sola trama. El códec G.723.1 genera una trama de voz cada 30 ms y cada una de ellas se enviará como un paquete simple RTP.

Utilizaremos estos valores de retraso de paquetización (T_{voice}):

Tabla 11 – Retraso de paquetización de cada códec.

Códec	Tasa (Kbps)	Retraso de paquetización (ms)
G.711	64	20
G.729	8	20
G.723.1	6.3	30

Los parámetros utilizados para este estudio se describen a continuación:

Tabla 12 – Parámetros utilizados

Símbolo	Descripción	Valor
B	Beacon frame size	320 bits
H	Protocol header overhead	456 bits
P	Physical layer header	192 bits
T_B	Beacon interval	10 ms
SIFS	SIFS time interval	28 μ s
CFend	CFP end frame	192 bits



Primero calcularemos el periodo producido por el Overhead durante el CFP. Lo podemos obtener a partir del documento [9], y viene dada por la siguiente ecuación:

Ecuación 7 – Periodo de Overhead

$$T_{over\ head} = \left(\frac{B + P}{R} + SIFS \right) \cdot \left(\frac{SF - CP}{T_B} \right) + \frac{CF_{end} + P}{R}$$

Donde B es el tamaño de la trama Beacon, P representa el tamaño de las cabeceras añadidas de la capa física, R es la tasa de canal de transmisión inalámbrica (en Mbps), $SIFS$ es el intervalo de tiempo utilizado para separar todos los fragmentos y ACKs que intervienen (en segundos), SF es el periodo de la supertrama, CP el periodo de contención, T_B es el periodo entre tramas Beacon, y CF_{end} es el tamaño (en bits) de la trama que señala la finalización del CFP.

T_{CFP} es el tiempo máximo de polling asignado a una llamada VoIP en el CFP. De modo que el intervalo de tiempo de paquetización más grande posible para una llamada de voz bidireccional sondeada durante la CFP será el siguiente:

Ecuación 8 – Periodo de sondeo durante el CFP

$$T_{poll-cfp} = \frac{(C \cdot (T_{voice} + T_{CFP}) + H + P) \cdot 2}{R} + 2 \cdot SIFS$$

Donde H designa el overhead producido por las cabeceras de los protocolos (en bytes). Con el fin de definir el tamaño del paquete, suponemos que C es la tasa de bits del códec empleado (en bps). En modo CBR, la suma de T_{VOICE} más el T_{CFP} es el tiempo máximo asignado a cada llamada, aunque no se genere un paquete (en este caso el AP pasará al siguiente QSTA).

El número de llamadas soportadas durante el periodo libre de contención será:

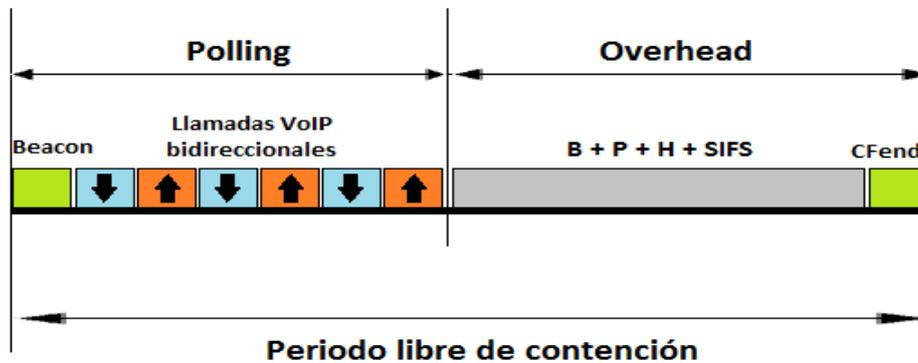
Ecuación 9 – Llamadas VoIP soportadas durante el CFP

$$N_{poll-cfp} = \frac{T_{CFP} - T_{over\ head}}{T_{poll-cfp}}$$



Con estas ecuaciones lo que buscamos es la relación de tiempo que tienen el periodo de sondeo (polling) y el periodo de overhead durante el periodo libre de contención. El esquema sería el siguiente:

Ilustración 28 – Relación Polling VS Overhead durante el CFP



Del mismo modo, se obtiene la ecuación para el tamaño de paquete máximo para las llamadas de voz sondeadas durante los periodos de acceso controlado (CAP) del CP y el número de llamadas soportadas durante el CP:

Ecuación 10 – Periodo de sondeo durante el CP

$$T_{poll-cp} = \frac{(C \cdot (T_{voice} + T_{CP}) + H + P) \cdot 2}{R} + 2 \cdot SIFS$$

Ecuación 11 – Número de llamadas soportadas durante el CP

$$N_{poll-cp} = \frac{T_{CP}}{T_{poll-cp}}$$

Durante el periodo de contención, los QSTAs tienen que luchar para el ganar el acceso canal y un cierto periodo de tiempo se desperdicia en la contienda y en el proceso de backoff. Mientras, en los CAP, el coordinador Híbrido (ubicado en el QAP), ganará el control del medio después de detectar el canal libre durante un periodo de tiempo PIFS. El AP sondea a los QSTAs, que tendrán su tráfico de voz en función de su esquema de polling definido.

De esta manera, cuando se termina el CFP (suponemos que las colas no están vacías), las estaciones de voz no están obligados a esperar al siguiente turno de CFP, sino que pueden volver a ser sondeadas por el HC en el CP, cuando se experimente un CAP, proporcionando un menor retraso end-to-end a las estaciones de voz.

El número total de llamadas de voz soportadas entonces puede obtenerse a partir de la suma de las ecuaciones 9 y 11, que calculan las llamadas de voz durante el CFP y CP respectivamente:



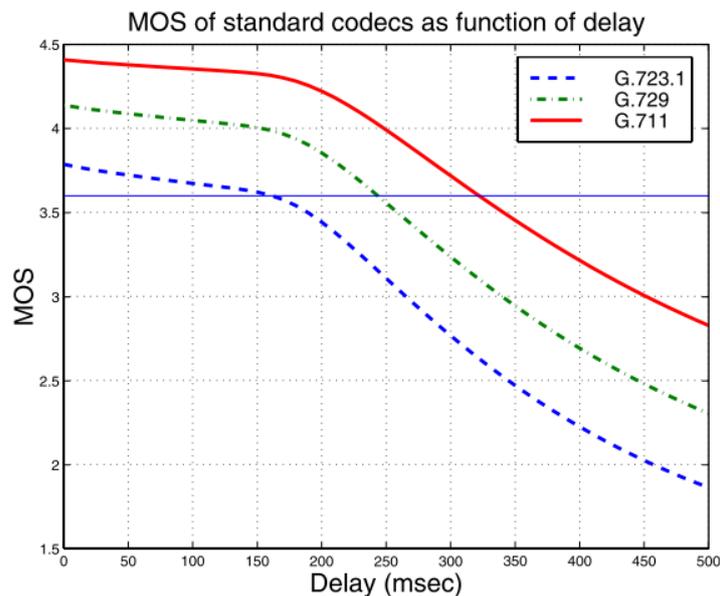
Ecuación 12 – Número de llamadas soportadas durante el CFP

$$N_{Total} = N_{poll-cp} + N_{poll-cfp}$$

La capacidad de VoIP también se mejora cuando se incrementa la duración SF, pero esto causa un retraso adicional, ya que se permite sondear más estaciones. A diferencia de trabajos relacionados, mostraremos como aumenta la capacidad VoIP de la red mientras aumenta la duración del CP y del CFP.

Compararemos la capacidad VoIP usando CBR en los códec G.711, G.729 y G.723.1, los códec de voz estándar. La siguiente figura compara la calidad de estos códec mostrando su MOS en función del retraso de la red y suponiendo que no hay pérdida de paquetes:

Ilustración 29 – MOS de los códec estudiados en función del retraso de la red



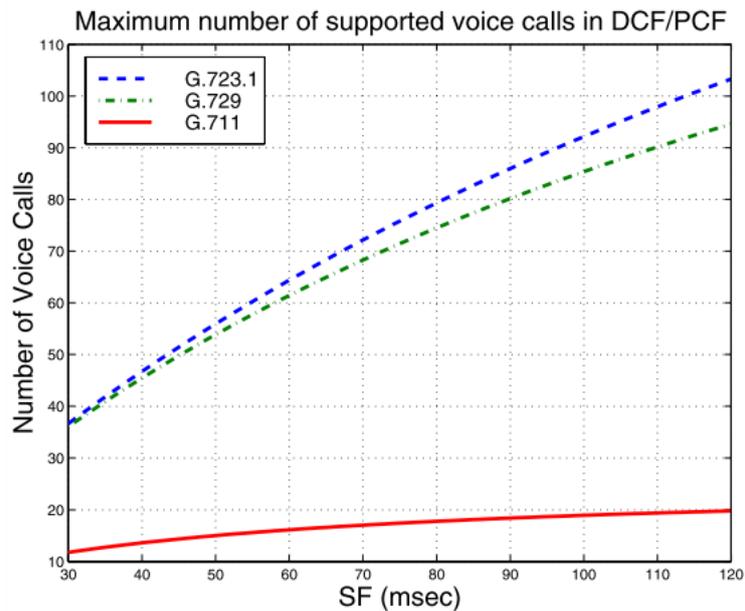
De esta figura, podemos observar como para un valor MOS de 3,6 (valor de la calidad de la RTC, que usamos de referencia), los códec tienen un valor de retardo de 170 ms, 240 ms y 325 ms respectivamente.

A diferencia de los estudios previos [9] [10], consideraremos que la longitud de la SF puede ser modificada, debido a la extensión de las llamadas de voz que se sondean en el CP (en los CAPs, junto con el tráfico de las estaciones que utilizan el mecanismo de contienda para ganar el canal).

En la siguiente figura, vemos para los tres diferentes tipos de codificación, la capacidad de llamadas VoIP en una red IEEE 802.11 de 11 Mbps en modo DCF/PCF (sin polling durante el CP) en función de la duración de la SF:



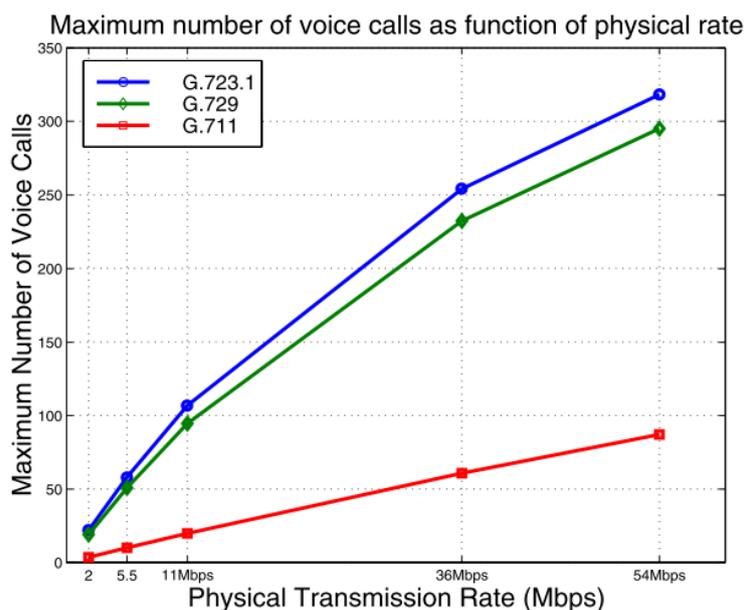
Ilustración 30 –Número máximo de llamadas VoIP en modo DCF/PCF (SF variable)



Como podemos ver en la imagen anterior, el tamaño de la SF variará de 30ms a 120ms. El número máximo de llamadas VoIP, para un valor de SF de 120 ms, es de 20 llamadas cuando utilizamos el códec G.711 y es mucho mayor para G.729 y G.723.1 (95 y 107, respectivamente). Este resultado es debido a que el códec G.711 tiene un throughput limitado. G.729 y G.723.1 mejoran la capacidad de la WLAN, pero a costa de una pequeña degradación de la calidad a causa del aumento del retardo. La calidad ofrecida por G.729 y G.723.1 es más sensible al retardo, como vimos en la figura 28.

Por otro lado, podemos ver la gráfica anterior en función de la tasa de transmisión, fijando una supertrama de 120ms:

Ilustración 31 – Número máximo de llamadas VoIP en modo DCF/PCF (SF fija)



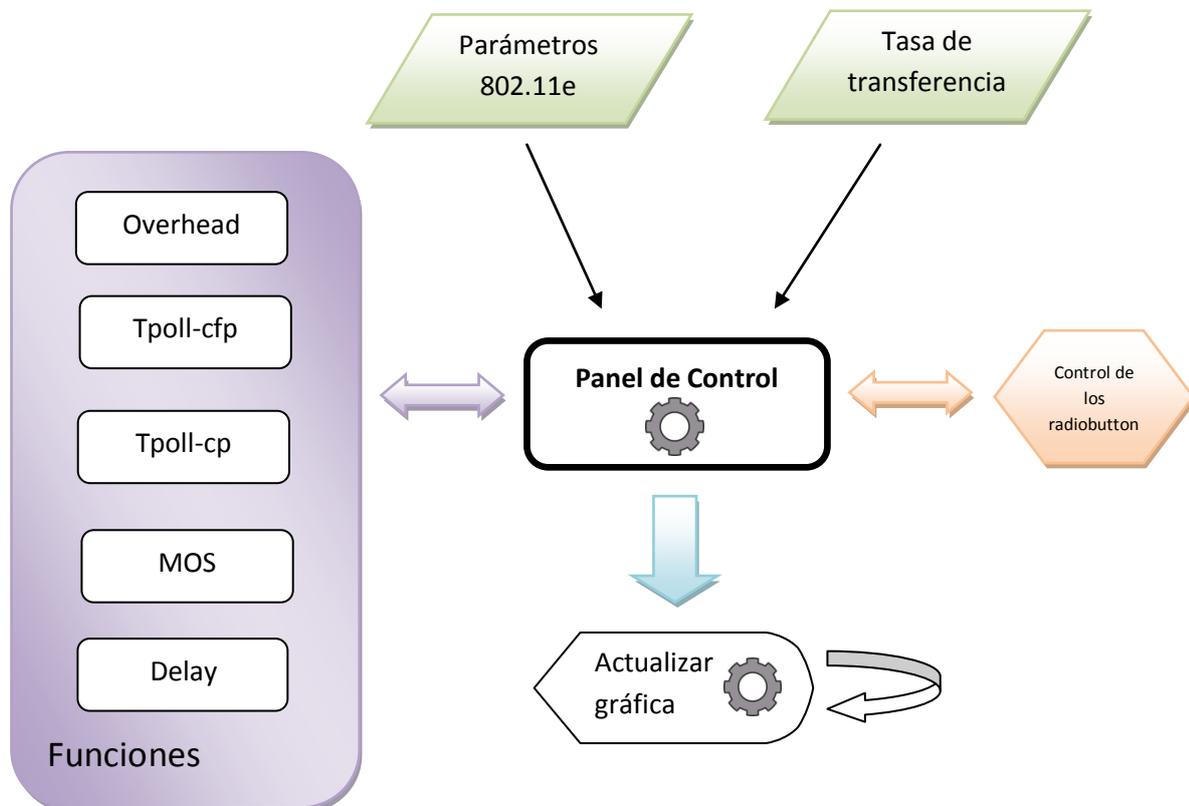
Utilizaremos las figuras 29 y 30 como partida para comparar el resultado obtenido en la simulación de la red en modo 802.11e y veremos cómo aumenta el número de llamadas posibles en función de la supertrama y de la tasa de transferencia.

5.5. Simulador Scilab

El simulador está formado por un panel de control que nos mostrará la gráfica que queramos obtener en función de los parámetros elegidos en el frame lateral *Parámetros* y de la tasa de transferencia seleccionada. Para las gráficas usaremos la función plot de Scilab, ajustando las coordenadas y las propiedades de los ejes.

Las funciones que definidas para este software son la obtención del efecto del Overhead, el cálculo del tiempo de polling durante el CFP y CP y el retraso en función del número de llamadas, que variarán según los parámetros del estándar 802.11e seleccionados. Con estas funciones podremos calcular el número de llamadas VoIP simultáneas siguiendo el cálculo teórico que hemos visto en el apartado anterior.

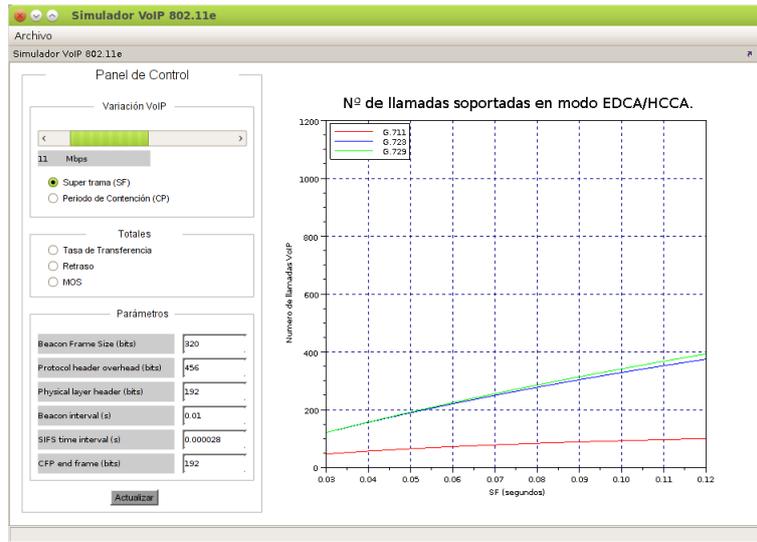
Ilustración 32 – Modelo Lógico del simulador VoIP 802.11e



El simulador nos presenta en pantalla una zona situada a la izquierda llamada Panel de Control desde el cual podremos regular la tasa de transferencia, los parámetros 802.11e y el tipo de función que queremos visualizar. Las funciones Súper trama y Periodo de contención mostrarán valores variables dependientes de la tasa de transferencia, mientras que las funciones tasa de transferencia, Retraso y MOS mostrarán valores totales en función e los parámetros y de la cantidad total de llamadas.

La parte de la derecha alberga las diferentes gráficas, que podemos visualizar cambiando las funciones y pulsando actualizar.

Ilustración 33 – Apariencia del simulador VoIP 802.11e



Para ejecutar el simulador podemos editarlo directamente en Scilab. La herramienta nos dará la opción de ‘Ejecutar archivo en Scilab’:

Ilustración 34 – Opción ‘Ejecutar archivo en Scilab’

```

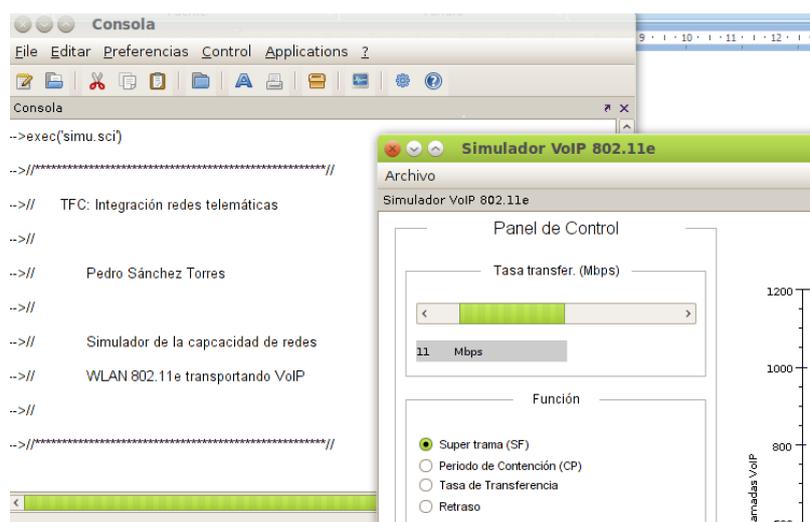
1 //*****//
2 // TFC: Integración redes telemáticas //
3 // //
4 // Pedro Sánchez Torres //
5 // //
6 // Simulador de la capacidad de redes //
7 // WLAN 802.11e transportando VoIP //
8 // //
9 //*****//
10
11
12 function principal()
13
14 //*****//
15 // VARIABLES GLOBALES //
16 // //
17 //*****//
18
19
20 global margin_x;
21 global margin_y;

```

También podemos compilar y ejecutar el programa directamente sobre el prompt mediante la instrucción `exec ('archivo')`:



Ilustración 35 – Ejecutar programa desde prompt Scilab



Una vez tenemos el simulador corriendo en nuestra máquina, estamos en condiciones de poder obtener los resultados y compararlos con los obtenidos en estudios anteriores (en modo DCF/PCF) para poder comprobar cómo se mejora la capacidad de las redes inalámbricas.

5.6. Resultado de la simulación

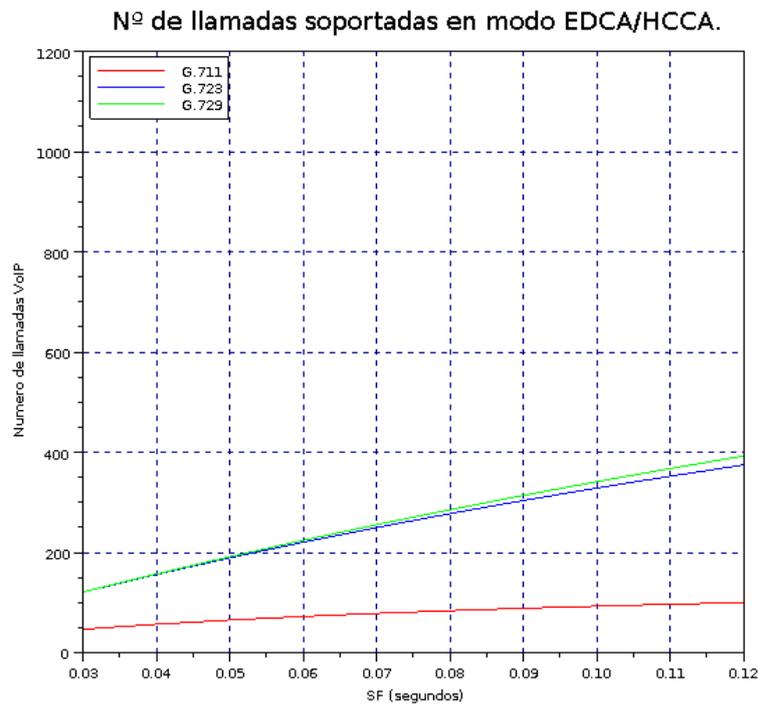
Para obtener los resultados de la simulación, utilizaremos los parámetros 802.11e por defecto que hemos cargado inicialmente (ver Tabla 11 – Parámetros utilizados), aunque cabe la posibilidad de variarlos en cualquier momento.

La primera función que utilizaremos será la de la súper trama. Empezaremos calculando el resultado de la capacidad de cada códec para una tasa de transferencia típica de 11 Mbps (802.11b). Como podemos observar en la siguiente imagen, nos aparecen graficadas las distintas capacidades de cada códec en un color (se muestra en la leyenda). La duración de la supertrama varía de 30 a 120 ms, para así compararlo con la Ilustración 29 –Número máximo de llamadas VoIP en modo DCF/PCF (SF variable).

En aquella figura, el número máximo de llamadas se obtenía cuando la super trama duraba 120 ms, concluyendo que el modo DCF/PCF puede contener, teóricamente, 20 llamadas cuando utilizamos el códec G.711 y alrededor de 100 cuando empleamos los códec G.723 y G.729. En modo EDCG/HCCA superamos estas cantidades, llegando a 100 llamadas con G.711 y aproximadamente 400 con G.723 y G.729, cuando la super trama llega a 120ms.

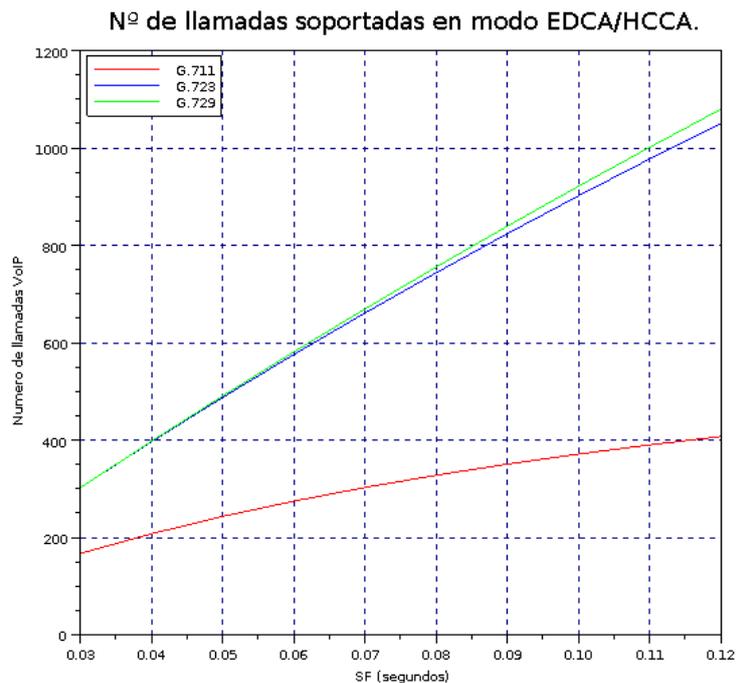


Ilustración 36 – Variación de la capacidad en función de la SF (11Mbps)



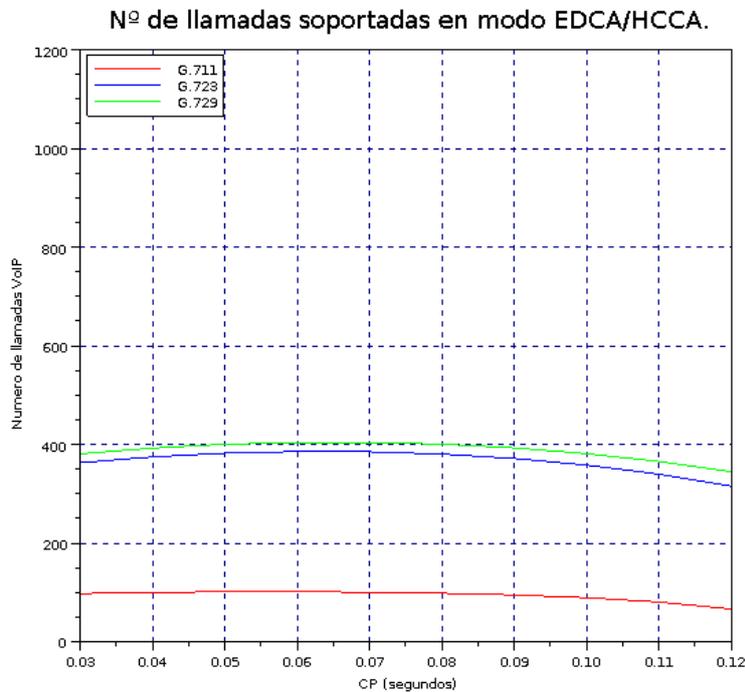
Si aumentamos la tasa de transferencia hasta el valor máximo del simulador (54Mbps) situándonos en la tasa de transferencia del estándar 802.11a, se mejora considerablemente la capacidad. Superamos las 1000 llamadas simultáneas con G.723 y G.729, mientras que G.711 nos permite 400 llamadas VoIP en la VoWLAN.

Ilustración 37 – Variación de la capacidad en función de la SF (54 Mbps)



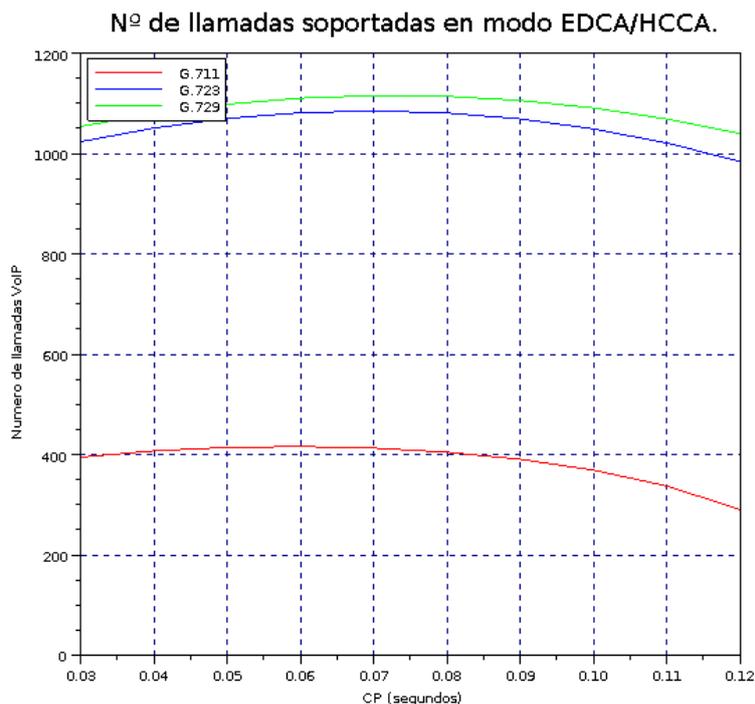
En la siguiente figura, presentamos la capacidad de los códec mientras variamos la duración del CP desde 30 a 120 ms (manteniendo constante la duración de la supertrama en 120ms). La máxima capacidad se obtiene cuando el CP está comprendido entre 50 y 70 ms.

Ilustración 38 – Variación de la capacidad en función del CP (11 Mbps)



Al igual que cuando variamos la súper trama, si subimos la tasa de transferencia a 54 Mbps, notamos la mejoría:

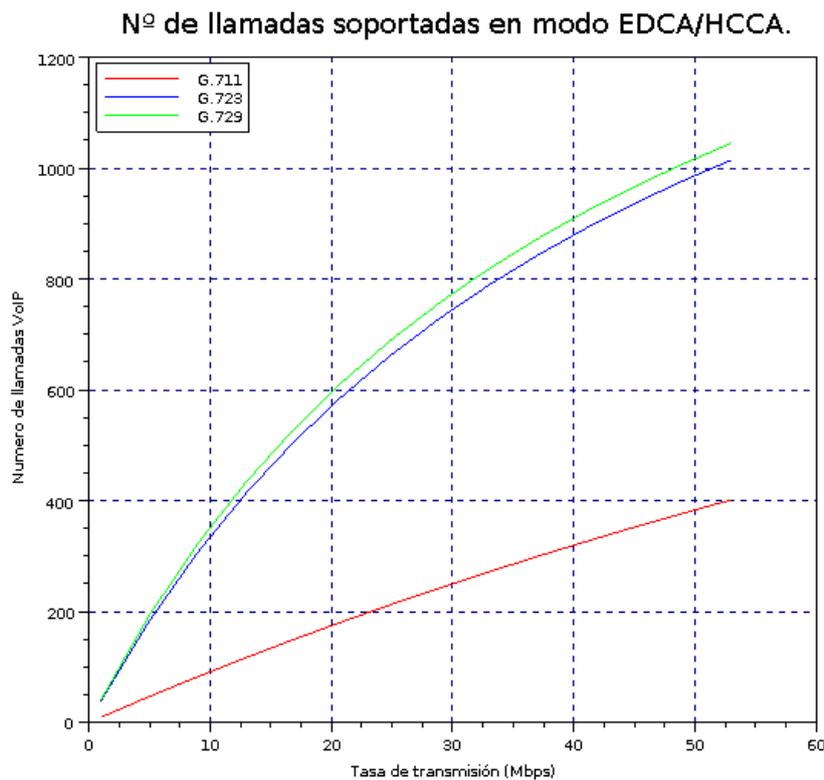
Ilustración 39 – Variación de la capacidad en función del CP (54 Mbps)



A partir de este resultado, llegamos a la conclusión de que simplemente regulando la duración del CP y quitando el CFP de la supertrama, podemos incrementar el número de llamadas simultáneas debido a la existencia de CAPs durante los cuales los QSTAS también pueden ser sondeados por el QAP (como se hace en el CFP).

Para ver más cómodamente como varía la capacidad de las VoWLAN 802.11e cuando subimos la tasa de transferencia podemos usar el simulador en la opción *Tasa de Transferencia*. En este modo, fijamos la súper trama en 120 ms. y calculamos la capacidad para cada uno de los valores.

Ilustración 40 – Variación de la capacidad en función de la tasa de transferencia



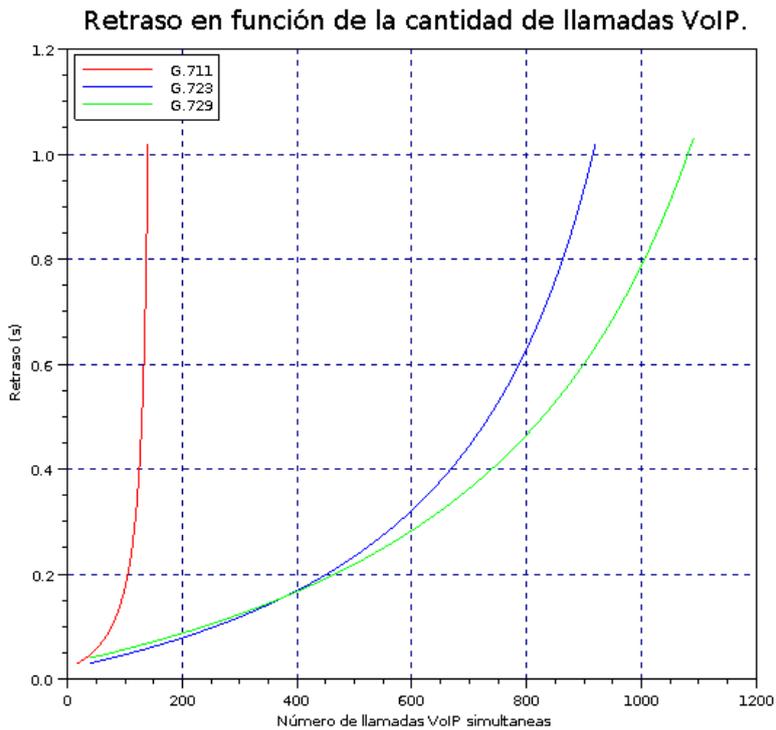
Del mismo modo que los casos anteriores, podemos compararlo con la Ilustración 30 – Número máximo de llamadas VoIP en modo DCF/PCF (SF fija). La diferencia salta a la vista, hemos conseguido mejorar las prestaciones de la red solo cambiando el modo de funcionamiento, con las mismas tasas de transferencias.

El retraso de los paquetes puede estar determinado por el número de TXOP (en cada SF) de que disponga cada llamada VoIP, y esto puede ayudar proporcionando bajo retraso end-to-end en los paquetes de voz. Como vimos, en este estudio consideramos que cada llamada solo dispone de una TXOP en cada SF, con el fin de encontrar el número máximo de llamadas simultáneas que se pueden soportar en WLAN 802.11e pero este hecho hace que aumente el retraso en los paquetes.

Usando los mismos parámetros de WLAN en el simulador, se muestra en la siguiente figura como la cantidad de llamadas influye en el retraso de los paquetes VoWLAN. Dicho retraso es dado por la suma del retardo en periodo de paquetización (varía en función del tamaño de bloque requerido por el codificador de voz y el número de bloques de una sola trama) y el tiempo empleado en la supertrama:

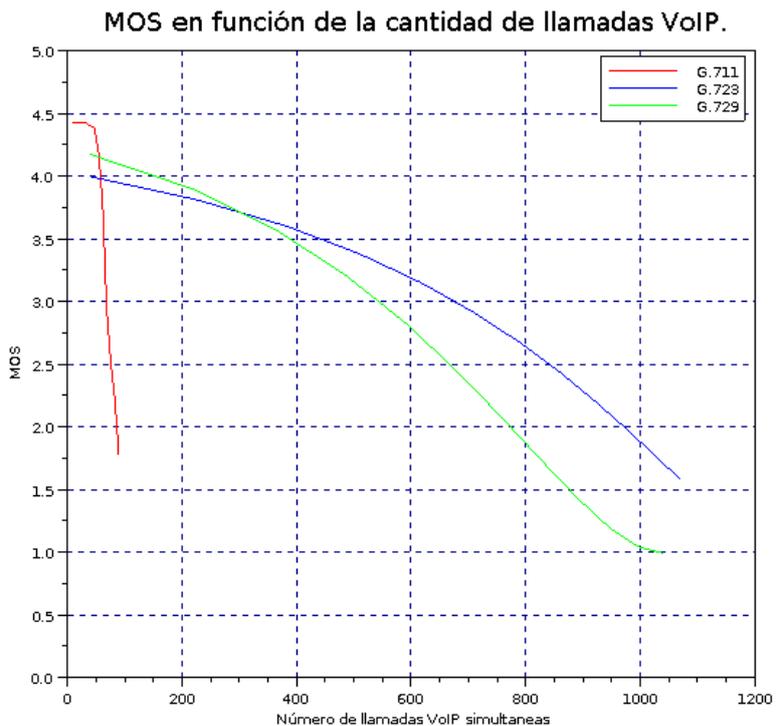


Ilustración 41 – Retraso en función de la cantidad de llamadas.



En la siguiente figura del simulador graficamos la relación de la calidad percibida MOS como función del número del número de llamadas VoIP, sin pérdida de paquetes y sin considerar el retraso de los paquetes que puede provocar ciertas partes de la red cableada.

Ilustración 42 – MOS en función de la cantidad de llamadas.



Para obtener este resultado, tenemos que calcular primero el retraso de los paquetes (calculado anteriormente) de cada códec, para poder encontrar el parámetro Id que simboliza el retardo del Factor R (ver Ecuación 2 – Cálculo del factor R), que a su vez utilizaremos para encontrar el MOS aplicado al códec y mapearlo contra el número total de llamadas. En este cálculo no se modela pérdida de paquetes ni el retraso añadido por la RTC en el destino.

Estas figuras ilustran un importante resultado: Se pueden soportar un gran número de llamadas VoIP (más de 300) con un lento aumento del retraso con el códec G.723.1 en comparación con el códec G.729

Esto puede ser explicado por el hecho de que gracias a que el códec G.723.1 tiene un menor tasa de bits (6.3 kbps), se pueden generar más frames de voz durante el mismo tiempo de paquetización. Así, para el mismo número de llamadas soportadas, G.729 y G.711 experimentan mayores retrasos que G.723.1.

Aunque G.729 representa mayores valores intrínsecos de calidad MOS que G.723.1, el retraso aumenta con el incremento de llamadas simultáneas (cuando se excede de 350 llamadas) a causa de una mayor degradación de la calidad que en los flujos de llamadas de G.723.1

5.7. Conclusiones obtenidas de la simulación

En este trabajo, hemos propuesto un modelo analítico para la capacidad de VoIP en redes WLAN IEEE 802.11e. Hemos demostrado como las redes WLAN que trabajan bajo el modo EDCA/HCCA mejoran la capacidad de la red en número total de llamadas respecto a los estándares que trabajan bajo DCF/PCF.

Tabla 13 – Número máximo de llamadas VoIP para los códec de voz estándar en función de la tasa de transmisión en modo DCF/PCF

Physical Rate	G.711 (64 kb/s)	G.729 (8 kb/s)	G.723.1 (6.3 kb/s)
2 Mbps	4	19	46
5.5 Mbps	10	51	58
11 Mbps	20	95	107
36 Mbps	61	232	254
54 Mbps	87	295	318

Hemos comprobado que la mejoría en la capacidad se debe a la extensión de los periodos de acceso controlado durante el periodo de contención (se aumenta las estaciones sondeadas en este periodo) y/o a la extensión de la supertrama 802.11e, comparando la capacidad con los distintos códec de voz estándar: G.711, G.729 y G.723.1.

Sin embargo, si la duración del CP se incrementa hasta la duración total de la SF, la capacidad de VoIP se reduce considerablemente, especialmente para códec con baja tasa de bits. Este hecho se puede ver en las ilustraciones 38 y 39 donde se muestra la gráfica de cómo varía la capacidad en función del periodo de contención. Esta disminución de la capacidad se debe principalmente a la sobrecarga de protocolo MAC durante el CP.



La principal demostración que hemos obtenido es que el incremento de la duración de la SF mejora significativamente el número de llamadas soportadas en comunicaciones VoIP. Sin embargo, la variación de la duración de la súper trama conlleva al aumento del retraso de los paquetes de voz. Llegamos a la conclusión de que el tamaño de la supertrama debe ser un equilibrio entre la capacidad de la WLAN requerido y el retraso máximo permitido para los paquetes de voz.

Cuanto más grande es la SF más capacidad, pero más retardo obtenemos. Así pues, esto deberíamos controlarlo, para no incurrir en más retrasos end-to-end del previsto para la voz a través de nuestra VoWLAN

Tabla 14 – Número máximo de llamadas VoIP para los códec de voz estándar en función de la tasa de transmisión en modo EDCA/HCCA

Physical Rate	G.711 (64 kb/s)	G.729 (8 kb/s)	G.723.1 (6.3 kb/s)
2 Mbps	19	77	86
5.5 Mbps	51	199	219
11 Mbps	99	360	392
36 Mbps	288	813	861
54 Mbps	400	997	1045

La capacidad VoIP experimenta un aumento de más del 400% en algún caso (G.711 pasa de 10 a 54 llamadas cuando se trabaja a 5.5 Mbps), simplemente cambiando el modo de funcionamiento.

Pero G.711 experimenta altos retrasos cuando existen más de 60 flujos a la vez (más de 500 ms de retraso) y esto provoca una inaceptable calidad (MOS por debajo de 3). Este resultado muestra que se puede obtener una óptima calidad en la WLAN con el uso de un mecanismo que determine el códec ideal en función de carga de flujos en la red (La información se podría transmitir entre los QSTAs y QAP).

Así, una posible configuración de nuestro sistema para optimizar nuestra red podría ser esta, extraída de la información que proporciona la *Ilustración 41 – MOS en función de la cantidad de llamadas*.

- Códec G.711 → cuando el número de flujos sea menor de 70
- Códec G.729 → cuando el número de flujos esté entre 70 y 350
- Códec G723.1 → cuando el número de flujos sea mayor de 350

Utilizando códecs de menor tasa de bits, obtendremos mayor número de llamadas VoIP pero, en términos generales, veremos en reducida la calidad de la conversación.

Para completar el estudio, en un trabajo futuro, podemos modelar cómo afecta la pérdida de paquetes durante la comunicación sobre la capacidad de VoIP en la red, ya que este hecho no formaba parte de los objetivos del proyecto.

6. Bibliografía

- [1] ITU-T Recommendation G.711. Pulse Code Modulation (PCM) of voice frequencies. ITU-T, November 1988.
- [2] ITU-T Recommendation G.729 Annex A. C source code and test vectors for implementation verification of the G.729 reduced complexity 8 kbit/s CS-ACELP speech codec. ITU-T, November 1996.
- [3] ITU-T Recommendation G.723.1 Speech coders : Dual rate speech coder for multimedia communications transmitting at 5.3 and 6.3 kbit/s. ITU-T, March 1996.
- [4] ITU-T Recommendation G.107. The Emodel, a computational model for use in transmission planning. ITU-T, March 2005.
- [5] ITU-T Recommendation G.114. One way transmission time. ITU-T, May 2003.
- [6] IEEE Std 802.11-1999, Part 11: Wireless LAN MAC and physical layer specifications. Reference number ISO/IEC 8802-11:1999(E).
- [7] IEEE 802.11e/D9.0. Wireless MAC and physical layer specifications: Medium Access Control (MAC) Quality of Service (QoS) Enhancements. August 2004.
- [8] A. Grilo and M. Nunes Performance Evaluation of 802.11e. In Proceedings of IEEE PIMRC 2002.
- [9] M. Veeraraghavan, N. Cocker, and T. Moors. Support of voice services in IEEE 802.11 Wireless LANs. In Proceedings of IEEE INFOCOM 2001, Alaska, April 2001.
- [10] D. P. Hole and F. A. Tobagi. Capacity of IEEE 802.11b Wireless LAN supporting VoIP. In Proceedings of IEEE ICC 2004, Paris, June 2004.
- [11] N. Smavatkul, Y. Chen, and S. Emeott. Voice capacity evaluation of IEEE 802.11a with automatic rate selection. In GLOBECOM 2003, San Francisco, December 2003.
- [12] D.-Y. Chen, S. Garg, M. Kappes, and K. S. Trivedi. Supporting VBR VoIP traffic with IEEE 802.11 WLAN in PCF mode. In Proceedings of OPNETWork 2002, Washington D. C., August 2002.
- [13] M. Karam and F. Tobagi. Analysis of the Delay and Jitter of voice traffic over the Internet. In Proceedings of IEEE INFOCOM 2001, Anchorage,AL, April 2001.
- [14] Michael F. Finneran, Voice Over Wlans: The Complete Guide,
- [15] Abdelbasset TRAD. Large Scale VoIP Deployment over Heterogeneous Environments,
- [16] Guefry Leider Agredo Méndez and Jaime Andrés Gaviria Molano,Evaluación experimental de la capacidad de IEEE 802.11b para soporte de VoIP
- [17] Malathi Veeraraghavan, Nabeel Cocker and Tim Moors, Support of voice services in IEEE 802.11 wireless LANs

