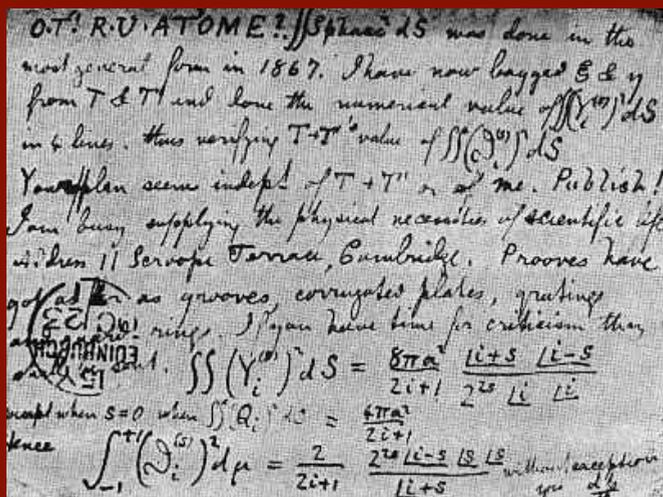


Tesis Doctoral Ingeniería Automática, Electrónica y de Telecomunicación

Optimización en el despliegue de servicios de Voz sobre IP (VoIP) sobre redes WiFi con restricciones de calidad de servicio



Autor: Vicente Jesús Mayor Gallego
Directores: Rafael María Estepa Alonso
Antonio José Estepa Alonso

Ingeniería Telemática
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020



Tesis Doctoral
Ingeniería Automática, Electrónica y de Telecomunicación

Optimización en el despliegue de servicios de Voz sobre IP
(VoIP) sobre redes WiFi con restricciones de calidad de
servicio

Autor:

Vicente Jesús Mayor Gallego

Directores:

Rafael María Estepa Alonso

Profesor Titular

Antonio José Estepa Alonso

Profesor Titular

Tutor:

Antonio José Estepa Alonso

Profesor Titular

Ingeniería Telemática
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

2020

Tesis Doctoral: Optimización en el despliegue de servicios de Voz sobre IP (VoIP) sobre redes WiFi con restricciones de calidad de servicio

Autor: Vicente Jesús Mayor Gallego
Director: Rafael María Estepa Alonso
Antonio José Estepa Alonso
Tutor: Antonio José Estepa Alonso

El tribunal nombrado para juzgar la Tesis arriba indicada, compuesto por los siguientes doctores:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

A mis padres

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a mis padres por su amor incondicional, apoyo y paciencia. Todo lo que he logrado a día de hoy es gracias a vosotros.

A mis directores de tesis, Antonio y Rafa, por guiarme en este camino y ayudarme tantísimo en este trabajo, y al resto de profesores del Departamento de Ingeniería Telemática por acogerme como a uno más.

A mis amigos, por su interés en mi investigación y carrera docente, por animarme cuando lo he necesitado y estar siempre ahí.

Todos formáis parte de este trabajo y sin vosotros no hubiera sido posible, muchas gracias.

Vicente Jesús Mayor Gallego
Sevilla, 2020

Resumen

Las tecnologías de Voz sobre IP (VoIP) han permitido el despliegue de nuevos servicios de voz a través de Internet durante las dos últimas décadas. Por otro lado, las redes inalámbricas de área local (WLAN) basadas en el estándar IEEE 802.11 (i.e., WiFi) han experimentado un crecimiento de popularidad debido a su bajo coste y flexibilidad. Sin embargo, el despliegue de comunicaciones de VoIP con garantías de calidad sobre redes IEEE 802.11 implica una serie de dificultades (i.e., los paquetes pueden sufrir pérdidas, colisiones, y retardos variables) que no han sido satisfactoriamente resueltas con las técnicas y modelos disponibles en la actualidad.

En esta tesis se desarrolla un nuevo modelo analítico de la sub-capa MAC de IEEE 802.11 que permite estimar la calidad y consumo energético de las conversaciones en un escenario realista de VoIP sobre WiFi (VoWiFi). Además, el modelo anterior se utiliza para plantear y resolver dos nuevas aplicaciones de despliegue y optimización de servicios VoWiFi: (a) el despliegue de vehículos aéreos no tripulados (UAVs) para proveer de un servicio de VoWiFi con garantías de calidad a un conjunto de usuarios y, (b) un nuevo mecanismo de control de admisión de llamadas en la red WiFi corporativa y unifica el acceso al servicio tanto para usuarios de terminales cableados como inalámbricos.

Validamos el modelo analítico propuesto frente a simulaciones realizadas con el simulador de red ns-3. Los resultados muestran la utilidad del modelo propuesto para predecir las prestaciones (e.g. retardo, pérdidas) y el consumo energético en la tarjeta de red cuando se transmiten flujos de voz sobre IEEE 802.11 en condiciones no ideales. Esta capacidad de predicción ha sido clave en las propuestas realizadas de nuevas aplicaciones. En el caso del despliegue de drones, nos ha permitido definir un nuevo problema de posicionamiento inicial que puede resultar muy práctico en situaciones de rescate al aire libre. En el caso del control de admisión en entornos corporativos, el modelo nos ha permitido predecir la capacidad máxima de flujos de voz que puede ser admitida en la organización para garantizar calidad a las conversaciones existentes. Usando esta capacidad, hemos planteado un algoritmo nuevo que puede ser utilizado para unificar el control de acceso para usuarios WiFi y usuarios de terminales cableados y que aumenta el número de usuarios concurrentes respecto a los algoritmos existentes.

Abstract

Voice over IP (VoIP) technologies have enabled the deployment of new voice services over the Internet during the last two decades. Meanwhile, wireless local area networks (WLAN) based on the IEEE 802.11 standard (i.e., WiFi) have grown in popularity due to their low cost and flexibility. However, the deployment of quality-guaranteed VoIP communications over IEEE 802.11 networks implies a series of technical difficulties (i.e. lost packets, collisions, and delays) that have not been successfully addressed by the techniques and models available today.

In this thesis, we develop a new analytical model for the IEEE 802.11 MAC sub-layer that allows one to estimate quality and energy consumption in a realistic VoIP over WiFi (VoWiFi) scenario. In addition, the previous model is used to propose and solve two new applications for the deployment and optimization of VoWiFi services: (a) deploying unmanned aerial vehicles (UAVs) to provide a VoWiFi service under guaranteed quality to a group of ground users and, (b) a new call admission control mechanism for WiFi corporate networks, which unifies the access to the voice service for both wired and wireless terminals.

We validate the proposed analytical model against simulation results obtained with the ns-3 network simulator. Results show the accuracy of the proposed model for the prediction of the performance (e.g. delay, losses) and energy consumption of network interfaces when voice flows are transmitted over IEEE 802.11 under non-ideal conditions. This prediction capability has been a key component of the two VoWiFi applications developed. In the UAV deployment, it has allowed us to define a new initial positioning problem that can be very practical in outdoor rescue situations. Regarding admission control in corporate environments, the model has allowed us to predict the maximum capacity of voice flows that can be admitted in the organization to guarantee quality to existing conversations. Using this capability, we have proposed a new algorithm that can be used to unify access control for wireless and wired users, and that increases the number of concurrent users with respect to existing algorithms.

Índice

Parte I	Introducción y fundamentos	1
1	Introducción	3
1.1	Motivación	4
1.2	Contribuciones	4
1.3	Estructura de la memoria	5
2	Fundamentos	7
2.1	El estándar IEEE 802.11	7
2.1.1	IEEE 802.11 DCF	8
2.1.2	Calidad de servicio	10
2.1.3	Consumo energético	12
2.2	Modelado analítico de DCF: modelo de Bianchi	13
2.3	Calidad de servicio en VoIP	15
3	Variantes del modelo analítico de Bianchi	19
3.1	Conclusiones	21
Parte II	Aportaciones	23
4	Modelo analítico para las prestaciones y consumo energético en escenarios realistas de VoWiFi	25
4.1	Modelo analítico	26
4.1.1	Probabilidad de transmisión	26
4.1.2	Errores en el canal	27
4.1.3	Tráfico de las estaciones	27
4.1.4	Tiempo medio de un estado	28
4.2	Expresiones analíticas para el consumo energético	31

4.2.1	Consumo asociado a los eventos	33
4.2.2	Probabilidad de los eventos	35
4.3	Expresiones analíticas para el retardo y las pérdidas	36
4.4	Resolución del modelo	37
4.5	Validación del modelo	37
4.6	Conclusiones	40
5	Despliegue de UAVs para servicio de VoWiFi	41
5.1	Introducción	41
5.2	Descripción del problema	43
5.2.1	Terminología	43
5.2.2	Definición del problema	44
5.3	Búsqueda exhaustiva	45
5.3.1	Evaluación de un posicionamiento: Check	45
5.4	Búsqueda heurística	49
5.4.1	Población inicial: GA_Populate	50
5.4.2	Generaciones sucesivas: GA_NextGen	51
5.5	Resultados numéricos	52
5.5.1	Situaciones de emergencia	52
5.5.2	Entornos no críticos	54
5.5.3	Escenario de larga duración	55
5.6	Conclusiones	56
6	Control de admisión de llamada unificado	59
6.1	Introducción	59
6.2	Escenario de aplicabilidad y visión general	62
6.2.1	Visión general del U-CAC	62
6.2.2	Ejemplo básico de operación	63
6.3	Algoritmos de decisión	64
6.3.1	U-CAC: modo básico	64
6.3.2	U-CAC: modo avanzado	65
6.4	Resultados	66
6.4.1	Metodología y parámetros	68
6.4.2	Resultados	69
6.5	Conclusiones	71
7	Conclusiones y líneas de avance	73
	<i>Índice de Figuras</i>	75
	<i>Índice de Tablas</i>	77
	<i>Bibliografía</i>	79

Parte I

Introducción y fundamentos

1 Introducción

Las redes telefónicas conmutadas tradicionales (*Public Switched Telephony Network* o PSTN) disponen de una infraestructura dedicada al transporte de voz, que permite garantizar unos requisitos mínimos de calidad de servicio (*Quality of Service* o QoS). A lo largo de los años, su uso ha sido reemplazado por redes multiservicio basadas en el protocolo de Internet (IP), que permiten la transmisión de cualquier tipo de información (e.g., voz, video, datos) y un mayor aprovechamiento de los recursos gracias a la conmutación de paquetes.

La Voz sobre IP (*Voice over IP* o VoIP) permite el transporte del tráfico de voz sobre la familia de protocolos de TCP/IP. Su uso ha experimentado un notable crecimiento durante las dos últimas décadas, por lo que puede considerarse una tecnología ya madura [1, 2]. Los operadores de telefonía tradicionales comenzaron a emplear VoIP en los años 90 para reducir costes, garantizando una QoS similar a la que se ofrecía en PSTN gracias al uso de técnicas como la reserva de capacidad o la priorización del tráfico en sus redes de transporte [3]. El uso de VoIP se extendió a los usuarios domésticos a través de Internet, no obstante, en un entorno sin el control del operador, la calidad de servicio no puede garantizarse dada la naturaleza *best-effort* del servicio de Internet [4].

El estándar IEEE 802.11 define una de las tecnologías más populares para desplegar redes inalámbricas de área local (*Wireless Local Area Network* o WLAN) [5]. El interés por las redes inalámbricas reside principalmente en la ubicuidad de los terminales móviles. Las WLAN basadas en el estándar IEEE 802.11 (i.e., WiFi) comparten la naturaleza *best-effort* del servicio de Internet. En el caso del tráfico de voz [6–8], la congestión de la red inalámbrica se refleja en un degradado general de todas las conversaciones en curso. En el despliegue de VoWiFi, un concepto habitual en la literatura es la capacidad VoIP, que representa el número máximo de llamadas simultáneas que la red WiFi puede soportar con garantías de QoS. Además, el medio inalámbrico induce problemas a nivel físico como el ruido o interferencias, que suponen nuevas dificultades en el contexto de la garantía de la QoS [9].

1.1 Motivación

El modelado analítico de la sub-capa MAC de IEEE 802.11 puede ser utilizado para estimar el número de conversaciones simultáneas (i.e. capacidad VoIP) que una red WiFi puede soportar con garantías de QoS. El modelo de Bianchi [10, 11] supuso un punto de inflexión en esta línea de investigación, modelando el mecanismo de acceso al medio, DCF, como una cadena de Markov bidimensional en tiempo discreto. Sin embargo, el modelo de Bianchi parte de una serie de suposiciones que no se corresponden con un escenario realista (e.g., saturación, canal ideal, homogeneidad). No obstante, pronto surgieron otros trabajos que ampliaban el modelo para considerar errores en el canal [12–14], colas no saturadas [15–19], o estaciones heterogéneas [15–19].

A pesar de los esfuerzos anteriores, ninguna de las propuestas logra modelar con precisión una red VoWiFi bajo circunstancias no ideales, ya que se la mayoría se centra en resolver alguna de las simplificaciones del modelo de Bianchi (e.g., condición de saturación) mientras simplifican u obvian el resto. No obstante, las técnicas presentadas en los trabajos anteriores pueden ser utilizadas conjuntamente para generar un modelo analítico válido que permita resolver un escenario VoWiFi realista. Esto último constituye el primer reto abordado en esta tesis.

Una vez que se disponga de un modelo realista, es posible utilizarlo como parte del desarrollo de nuevas aplicaciones o problemas relacionados con el ofrecimiento del servicio de VoWiFi con garantías de QoS. Esto último es el segundo reto que abordamos en este trabajo. Se presentan dos aplicaciones del modelo analítico desarrollado: (a) se plantea el despliegue de vehículos aéreos no tripulados (UAVs) para proveer de un servicio de VoWiFi a un conjunto de usuarios y, (b) se propone un nuevo mecanismo de control de admisión de llamadas para entornos corporativos que optimiza la capacidad VoIP de las redes de acceso inalámbricas.

1.2 Contribuciones

En el marco anterior, esta tesis propone el despliegue y optimización de servicios VoWiFi con garantías de calidad. Las aportaciones pueden enumerarse como sigue a continuación:

- Se propone un nuevo modelo analítico del mecanismo de acceso al medio IEEE 802.11 bajo condiciones más realistas que aquellas en las que se basan los modelos actuales. Para ello, se utiliza como base un conjunto de técnicas y modelos ya existentes en la literatura, y se adapta para el tráfico de VoIP. Este modelo ofrece nuevas expresiones analíticas para estimar tanto el rendimiento como el consumo energético de la red.
- Se desarrollan dos nuevas aplicaciones del modelo anterior:
 - Se propone el despliegue de un servicio VoWiFi mediante UAVs equipados con puntos de acceso [20]. Este servicio permitirá a los usuarios realizar llamadas de voz con calidad garantizada en una zona sin infraestructura de comunicaciones.
 - Se diseña un mecanismo de admisión de llamadas (CAC) en entornos corporativos que combine en un único sistema el acceso a los recursos de las redes

PSTN y WiFi [21]. El CAC además ofrece algunas funcionalidades de optimización que permitirá maximizar el número máximo de llamadas simultáneas que la red inalámbrica puede soportar.

1.3 Estructura de la memoria

La memoria se divide en dos partes. La primera incluye los Capítulos 1 al 3 (introducción, fundamentos y estado del arte), la segunda incluye los Capítulos del 4 al 6 y se corresponde con las contribuciones de la tesis señaladas anteriormente.

En la primera parte, el Capítulo 2 proporciona una serie de fundamentos básicos necesarios para comprender las aportaciones de la tesis. En primer lugar, se presenta una breve descripción del estándar IEEE 802.11, su mecanismo de acceso al medio más básico y popular (*Distributed Coordination Function* o DCF), su revisión más importante en términos de calidad de servicio (i.e., IEEE 802.11e), y los mecanismos de ahorro de energía más utilizados. A continuación, se presenta el modelo analítico de Bianchi, uno de los modelos más básicos y representativos de la literatura científica. Finalmente, se presenta una sección que resume los métodos más recurrentes de la evaluación objetiva de la calidad de una conversación. El Capítulo 3 incluye una revisión del estado del arte sobre el modelado analítico de redes IEEE 802.11, en la que se incluye un estudio comparativo de las propuestas más recurrentes en la literatura, y se identifican los problemas que impiden su aplicación directa en escenarios VoWiFi.

En la segunda parte, el Capítulo 4 presenta un nuevo modelo analítico válido para VoWiFi que parte de un modelo existente y lo adapta mediante técnicas ya presentes en la literatura. Además, se proporcionan expresiones que permiten calcular tanto la calidad como el consumo energético de la red. Los Capítulos 5 y 6 presentan dos ejemplos de aplicabilidad del modelo anterior en el contexto del despliegue y optimización de redes VoWiFi: (a) el despliegue de UAVs equipados con puntos de acceso WiFi para dar servicio de VoIP, y (b) un mecanismo de control de admisión de llamadas válido para entornos corporativos. La memoria concluye con el Capítulo 7, que presenta las conclusiones obtenidas y líneas de investigación futuras.

2 Fundamentos

En este capítulo se presentan una serie de fundamentos necesarios para comprender las aportaciones de la tesis. En primer lugar, en la Sección 2.1 se describe el mecanismo de acceso al medio propuesto en el estándar IEEE 802.11. A continuación, en la Sección 2.2 se resume el modelo de Bianchi. Para finalizar, en la Sección 2.3 se presentan una serie de consideraciones a tener en cuenta en la garantía de la calidad de servicio (QoS) en VoIP.

2.1 El estándar IEEE 802.11

El estándar IEEE 802.11 [22] recoge un conjunto de protocolos y especificaciones que tienen como objetivo proveer de conectividad inalámbrica en área local (i.e., WLAN) a dispositivos tanto fijos como móviles, denominados en adelante estaciones. Las estaciones pueden enviar y recibir información a través del medio inalámbrico mediante dos topologías diferentes: modo infraestructura y *ad-hoc*. Mientras que en *ad-hoc* las estaciones se comunican directamente entre sí formando una estructura de nodos descentralizada, en el modo infraestructura lo hacen a través de una estación base llamada punto de acceso (i.e., *Access Point* o AP).

El estándar ofrece una guía que describe el comportamiento de las capas, tanto física como de enlace de datos, definidas en la arquitectura OSI [23], como se representa en la Figura 2.1. Desde su publicación, el estándar ha incorporado numerosas revisiones etiquetadas con una letra minúscula (e.g., a, b, g, n, ac, ax) que ofrecen mejoras y novedades sobre su versión original. Salvo la revisión IEEE 802.11e, el resto no modifican el comportamiento de la sub-capa MAC salvo sus parámetros, centrando sus mejoras en la capa física, mediante la inclusión de nuevos esquemas de modulación y codificación (i.e., MCS o *Modulation and Coding Schemes*).

El nivel más bajo definido en el estándar IEEE 802.11 corresponde a la capa física en OSI. El estándar divide esta capa en dos niveles: PMD o *Physical Medium Dependent Layer*, que interacciona con el medio inalámbrico; y PLCP o *Physical Layer Convergence Protocol*, que facilita la sincronización en la recepción de datos. La sub-capa PMD del estándar original ofrece tres opciones: *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS), *Frequency*

OSI Data Link Layer	802.2 Logical Link Control (LLC)					
	802.11 Media Access Protocol (MAC)					
OSI Physical Layer (PHY)	802.11 Physical Layer Convergence Protocol (PLCP)					
	DSSS/FSSH/IR (802.11)	OFDM (802.11a)	HR-DSSS (802.11b)	ERP-OFDM (802.11g)	HT (802.11n)	VHT (802.11ac)

Figura 2.1 Arquitectura en redes IEEE 802.11.

Hopping Spread Spectrum (FHSS) e infrarrojo (IR). Las revisiones posteriores adoptaron nuevas modulaciones y codificaciones aprovechando las nuevas tecnologías, como *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*, *High-Rate DSSS*, *Extended Rate Physical OFDM*, *High Throughput*, o *Very High Throughput*. Estas tecnologías funcionan en las bandas de 2.4 ó 5 GHz, y ofrecen diferentes tasas físicas (e.g., de 6 a 54 Mbps en IEEE 802.11g) según la revisión. Además, las revisiones más modernas (i.e., a partir de IEEE 802.11n) permiten transmitir y recibir datos mediante múltiples antenas (MIMO), lo cual mejora aún más la tasa de transferencia. En cuanto a la sub-capa PLCP, proporciona tanto un preámbulo que permite al receptor sincronizar la recepción de datos en el demodulador, como una cabecera que ofrece información acerca de la duración de la transmisión o la tasa.

Por encima de la capa física se encuentra la capa de enlace de datos, que a su vez se divide en dos sub-capas: MAC (*Medium Access Control*) y LLC (*Logical Link Control*). La sub-capa MAC se encarga de definir el mecanismo de acceso al medio por el cual las estaciones regulan su acceso al canal inalámbrico compartido. En cambio, LLC maneja el control de errores, flujo y secuencia.

En el contexto de este trabajo resulta de especial interés el estudio de la sub-capa MAC. Por ello, el resto de la sección se centra en describir algunos de sus aspectos más significativos: el mecanismo de acceso al medio más básico (DCF), algunas de las mejoras propuestas en la revisión IEEE 802.11e, y sus mecanismos de ahorro de energía.

2.1.1 IEEE 802.11 DCF

La sub-capa MAC (*Medium Access Control*) es la encargada de proporcionar un mecanismo mediante el cual las estaciones acceden al medio inalámbrico. A pesar de que el estándar propone diferentes métodos, todos se construyen sobre un procedimiento base conocido como DCF o *Distributed Coordination Function* (ver Figura 2.2).

DCF define un proceso estocástico que ejecutan todas las estaciones y regula el acceso al medio inalámbrico. Antes de transmitir, todas las estaciones comprueban el estado del medio (i.e., libre u ocupado) observándolo durante un periodo de tiempo fijo llamado DIFS (*Distributed Inter-frame Spacing*). Las estaciones consideran el medio libre si no detectan ninguna transmisión en dicho periodo, y ocupado en caso contrario. Los periodos libres se

Point Coordination Function (PCF)	HCF Controlled Access (HCCA)	HCF Contention Access (EDCA)	MCF Contention Access (MCCA)
Distributed Coordination Function (DCF)			

Figura 2.2 Sub-capa MAC en 802.11.

discretizan definiendo unidades mínimas de tiempo llamadas *time slots*, de modo que las estaciones esperan un número de *slots* libres antes de cada transmisión. La duración de las transmisiones dependerá del tamaño de la trama y su resultado (e.g., éxito, colisión, o corrupción por ruido).

Tras cada transmisión exitosa, las estaciones inician un contador decreciente llamado *back-off*, que selecciona un número aleatorio de *slots* entre 0 y $W_o - 1$ siguiendo una distribución uniforme. Dicho contador se decrementa en una unidad por cada *slot* libre, deteniéndose si el medio es ocupado y continuando en caso contrario. Al llegar a cero, la estación transmite y, si coincidiese con otra estación, tendría lugar una colisión. Para reducir la probabilidad de que sucedan j colisiones consecutivas, el contador de *back-off* es reiniciado tras cada colisión, escogiendo un nuevo valor en el rango $\{0, \dots, W_j - 1\}$, hasta un máximo de M veces (i.e., número máximo de reintentos). W_j representa el valor máximo de la ventana de contención, y puede calcularse como $W_j = 2^{\min(j,m)}W_o$, donde m representa el número máximo de veces que puede doblarse. Tanto m , M y W_o dependen de la revisión del estándar utilizada; por ejemplo, en 802.11b: $m = 5$, $M = 11$ y $W_o = 32$.

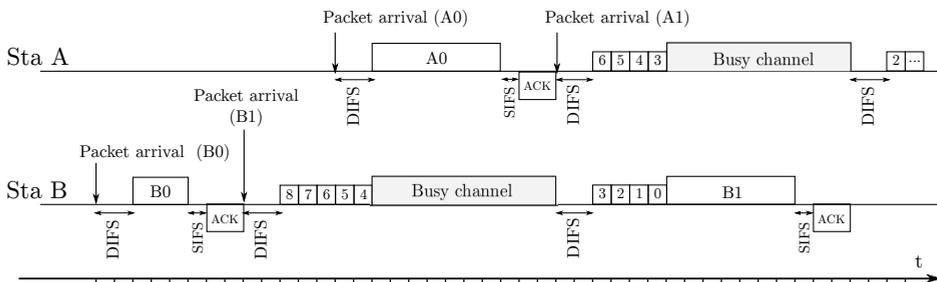


Figura 2.3 Funcionamiento de DCF.

La Figura 2.3 muestra un ejemplo muy básico del funcionamiento de DCF con dos estaciones. La estación B recibe un paquete (B0) que transmite tras comprobar que el medio se encuentra libre. Al finalizar la transmisión, hay otro paquete disponible pero, antes de proceder, debe ejecutar el contador de *back-off*. Durante su espera, la estación A transmite un paquete (A0) puesto que encuentra el canal libre, congelándose de este modo el contador de la estación B. Al finalizar la transmisión, B retoma su contador hasta llegar a 0 y transmite el paquete B1, deteniéndose el contador de *back-off* de la estación A hasta que el canal vuelve a quedar libre.

Además de DCF, la versión original del estándar incluye un mecanismo de acceso

centralizado llamado *Point Coordination Function* (PCF), que combina periodos de tiempo de contención (DCF), con otros periodos en el que el punto de acceso actúa de coordinador indicando a las estaciones su momento para transmitir. A pesar de que la centralización propuesta en PCF facilita un mayor control sobre el retardo extremo a extremo de las transmisiones, se requieren nuevas tramas de control que reducen la capacidad efectiva de la red [24].

2.1.2 Calidad de servicio

La provisión de QoS en Internet ha sido objeto de numerosos estudios [5, 25, 26]. Debido a su naturaleza *best-effort*, el servicio de Internet carece de mecanismos que permitan garantizar una calidad de servicio mínima. Sin embargo, existen una serie de técnicas que permiten controlar parcialmente la QoS, como la reserva de recursos por flujo o clase de tráfico, la distinción y priorización de servicios, el control de admisión de nuevas sesiones, el control de congestión, la planificación de las transmisiones y el control del tráfico transmitido según las condiciones de la red. A pesar de que la mayoría de las propuestas anteriores fueron diseñadas para redes cableadas, éstas pueden ser aplicadas en redes inalámbricas. No obstante, las redes inalámbricas presentan nuevos retos que motivan el desarrollo de nuevas técnicas [27] para ofrecer garantías de QoS.

La versión original del estándar IEEE 802.11 carece de mecanismos para proporcionar garantías de QoS. La revisión IEEE 802.11e [28] es publicada en 2005 para mejorar la sub-capas MAC incluyendo las siguientes características: (a) priorización de tráfico, (b) negociación de parámetros de QoS, y (c) control de admisión. No obstante, las técnicas anteriores no permiten garantizar la QoS ya que si el tráfico excede la capacidad de la red inalámbrica (i.e., congestión) provocaría el degradado general de su rendimiento. A pesar de que la congestión puede ser evitada mediante el control de admisión, el estándar no propone ningún algoritmo de admisión de flujos.

La revisión IEEE 802.11e introduce un nuevo mecanismo de acceso al medio basado en contención llamado EDCA (*Enhanced Distributed Channel Access*) y un mecanismo basado en sondeo llamado HCCA (*HCF Controlled Channel Access*), orientados al despliegue de aplicaciones sensibles en términos de QoS (e.g., voz, video). Por otro lado, se introduce un intervalo de tiempo llamado oportunidad de transmisión (TXOP o *Transmission Opportunity*) que permite a las estaciones enviar más de una trama en un mismo acceso al medio. En particular, a continuación se profundiza en el comportamiento de EDCA y TXOP, ya que resultan de especial interés para el desarrollo de la tesis.

Enhanced Distributed Channel Access (EDCA) Tal como se explicó con anterioridad, tras cada transmisión exitosa en DCF se ejecuta el proceso de *back-off* (i.e. ventana de contención) que trata de evitar colisiones. En EDCA, la ventana de contención es también utilizada para proporcionar priorización de tráfico [29]. Este efecto se logra ajustando el tamaño de la ventana de contención, de modo que se asignan ventanas más pequeñas para el tráfico más prioritario, lo que le da ventaja en la contienda.

Formalmente, cada estación dispone de cuatro categorías de acceso (AC o *Access Category*), cuyo comportamiento es el equivalente al de cuatro colas DCF independientes. La clasificación del tráfico se realiza a partir del campo de prioridad *User Priority* (UP)

especificada en la revisión IEEE 802.11d [30], y se relaciona con cada AC como se representa en la Tabla 2.1. Cada AC presenta sus propios parámetros (e.g., ventana de contención, oportunidad de transmisión) que define su prioridad en la contienda.

Además, cada categoría de acceso personaliza su tiempo de espera entre tramas (IFS o *Inter-frame Spacing*). Mientras que en DCF el tiempo que el canal debe escucharse para asegurar su disponibilidad es fijo y común para todas las estaciones (DIFS), en IEEE 802.11e se define un tiempo AIFS (*Arbitrary Inter-frame Spacing*) diferente para cada categoría de acceso, que proporciona una mayor granularidad en la diferenciación del tráfico.

Tabla 2.1 Relación entre UP y AC.

802.11d UP	802.11e AC	Descripción
1	AC_BK	Background
2	AC_BK	Background
0	AC_BE	Best Effort
3	AC_BE	Best Effort
4	AC_VI	Video
5	AC_VI	Video
6	AC_VO	Voice
7	AC_VO	Voice, Network management

Transmission Opportunity (TXOP) La revisión IEEE 802.11e propone un método para que las estaciones puedan enviar varias tramas consecutivas en forma de ráfagas, disminuyendo así el tiempo perdido entre transmisiones como se representa en la Figura 2.4. El tiempo invertido en el envío de tramas a ráfagas se conoce como TXOP y está limitado por un límite superior llamado *TXOP Limit*. Cada categoría de acceso EDCA presenta su propio valor para *TXOP Limit*, lo que proporciona otra variable más en la priorización del tráfico.

La Figura 2.4 ilustra un ejemplo de ráfaga con duración TXOP. En ella, la estación envía tres tramas de datos en un único acceso al medio. Observe que la duración de la ráfaga (TXOP) incluye el tiempo invertido en la transmisión de datos, recepción de asentimientos y los tiempos de espera entre tramas (SIFS).

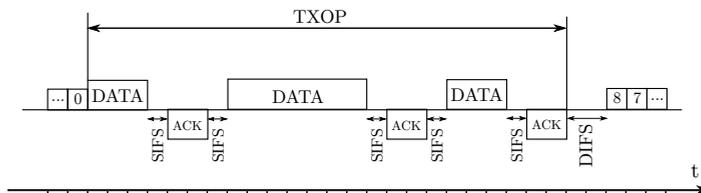


Figura 2.4 Ejemplo de ráfaga con TXOP.

2.1.3 Consumo energético

El consumo energético de las tarjetas de red (NIC o *Network Interface Card*) de las estaciones WiFi puede estudiarse a partir del tiempo invertido en cada estado (e.g., transmisión, recepción, reposo, sueño) y su potencia:

$$E = \rho_{tx} T_{tx} + \rho_{rx} T_{rx} + \rho_{idle} T_{idle} + \rho_{sleep} T_{sleep} \quad (2.1)$$

donde ρ_{tx} , ρ_{rx} , ρ_{idle} y ρ_{sleep} representan los términos de consumo (en Vatios) de los estados de transmisión, recepción, reposo y sueño, respectivamente; y T_{tx} , T_{rx} , T_{idle} y T_{sleep} el tiempo invertido en cada estado.

La versión por defecto de DCF no incorpora ningún mecanismo de ahorro de energía (i.e., $T_{sleep} = 0$). No obstante, el estándar original y la revisión IEEE 802.11e presentan dos mecanismos opcionales que modifican el comportamiento de acceso al medio de las estaciones: PSM (*Power Saving Mode*) y APSD (*Automatic Power Save Delivery*), respectivamente. A continuación se presentan ambas propuestas.

Power Saving Mode (PSM) El estándar IEEE 802.11 original define un mecanismo de ahorro de energía llamado *Power Saving Mode* o PSM, que permite a las estaciones entrar en un estado de bajo consumo, conocido como sueño, en el que sacrifican su capacidad para transmitir o enviar información a cambio de ahorrar energía durante periodos de inactividad.

En el modo infraestructura¹, el punto de acceso (AP) mantiene un seguimiento sobre el modo energético de las estaciones asociadas. Para facilitararlo, las estaciones informan al punto de acceso cuando cambian su modo de funcionamiento utilizando la cabecera de control de las tramas enviadas. A partir de este seguimiento, el AP puede retener todas las tramas *unicast* o *multicast* destinadas a estaciones que se encuentren operando en PSM. Periódicamente, los puntos de acceso envían tramas a difusión (i.e., *beacons*) con un nuevo campo llamado TIM (i.e., *Traffic Indicator Map*), que incluye información sobre el tráfico disponible para las estaciones. Cada cierto tiempo se enviará una *beacon* especial, conocida como DTIM o *Delivery Traffic Indication Message*, con información del tráfico a difusión disponible. Las estaciones deberán programar intervalos de escucha para la recepción de las *beacons* (i.e., no necesariamente todas), siendo estrictamente necesario la escucha aquellas que contengan DTIM. Finalmente, las estaciones pueden solicitar la recepción del tráfico *unicast* retenido enviando una trama de control llamada PS-POLL. El tráfico *multicast* y a difusión, en cambio, es enviado inmediatamente después de transmitir una *beacon* con DTIM. El punto de acceso utilizará el campo *More Data* (MD) para indicar si quedan tramas almacenadas para la estación. En la Figura 2.5 se representa un ejemplo de acceso con PSM.

Automatic Power Save Delivery (APSD) A pesar de que PSM logra reducir el consumo energético de las estaciones, el uso de tramas de señalización adicionales (e.g., PS-POLL) afecta negativamente al rendimiento de la red, ya que incrementa el tráfico e

¹ Se considera únicamente el modo infraestructura puesto que es la configuración más común en el despliegue de aplicaciones en tiempo real (e.g., VoIP).

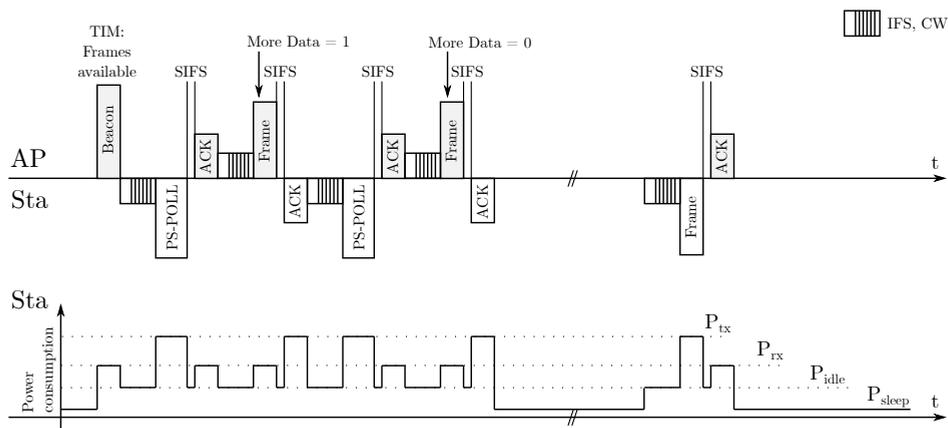


Figura 2.5 Ejemplo de acceso con PSM.

incluye un componente más en el retardo de los paquetes recibidos. Para solventarlo, la revisión IEEE 802.11e propone un nuevo mecanismo de ahorro de energía llamado APSD (*Automatic Power Save Delivery*), en dos variantes: una distribuida (*Unscheduled APSD*) y otra centralizada (*Scheduled APSD*). Esta sección se centra en describir el funcionamiento de U-APSD, ya que su diseño es especialmente adecuado para flujos de comunicaciones bidireccionales (e.g., VoIP).

La principal novedad de U-APSD pasa por la supresión de las tramas de señalización (i.e., PS-POLL) utilizadas en PSM. Para ello, APSD define un *Service Period* o SP como un periodo de tiempo en el que la estación se mantiene activa y disponible para recibir tramas. Las estaciones pueden configurar sus colas de acceso como *trigger-enabled* para que sus tramas de datos (i.e., *QoS Data* o *QoS Null*) se utilicen como iniciadores de un periodo de servicio. Durante un SP, el punto de acceso puede enviar a la estación una o más tramas (i.e., hasta un máximo especificado en *Max_SP_Length*) de un AC concreto si esta se configura como *delivery-enabled*, respetando la configuración de longitud máxima de las ráfagas (TXOP). El fin de un periodo de servicio se señala a través del campo EOSP o *End-of-Service Period* de la cabecera de control de la trama. El procedimiento anterior queda representado en la Figura 2.6.

Gracias al funcionamiento anterior, se prescinde de tramas de señalización en comunicaciones bidireccionales, ofreciendo un mejor rendimiento e incluso reduciendo aún más el consumo de las estaciones respecto a PSM. Además, ofrece compatibilidad con estaciones PSM mediante la configuración de las categorías de acceso (*trigger-enabled* o *delivery-enabled*).

2.2 Modelado analítico de DCF: modelo de Bianchi

El estudio de Bianchi [10, 11] impulsó el modelado de la sub-capa MAC de IEEE 802.11 como una cadena de Markov bidimensional en tiempo discreto. Este modelo asume que en la WLAN existen n estaciones idénticas (i.e., que comparten los mismos parámetros) cuyas

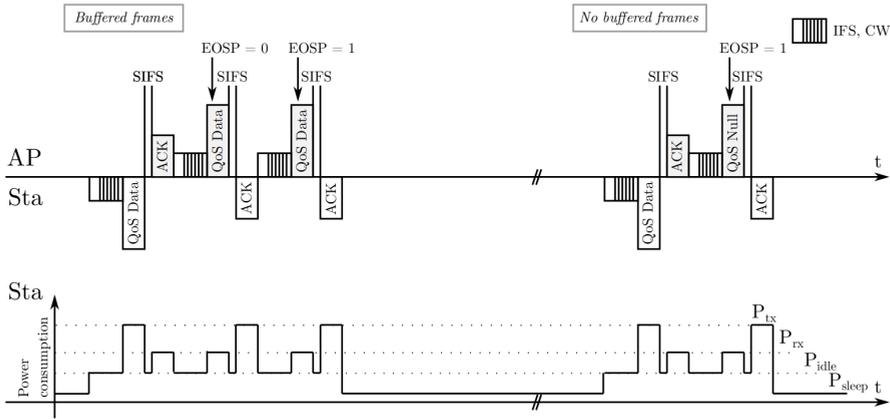


Figura 2.6 Ejemplo de acceso con U-APSD.

colas de acceso al medio siempre tienen paquetes disponibles para transmitir (i.e., supone colas saturadas), y un número infinito de reintentos. Para modelar este sistema, cada estado de las estaciones se representa bajo el par de variables $(s(t), b(t))$ donde t representa el instante de tiempo discretizado en forma de *time slots*, $s(t) \in \{0, \dots, m\}$ la fase de *back-off* en la que se encuentra la estación, y $b(t) \in \{0, \dots, W_{s(t)} - 1\}$ representa el número de *slots* libres que deben esperarse hasta el próximo intento de transmisión.

El sistema anterior conforma una cadena de Markov irreducible y aperiódica cuya variable central es comúnmente llamada τ : la probabilidad de que una estación observada haga un intento de transmisión en un *time slot* aleatoriamente escogido, y puede calcularse como la suma de probabilidades de estar en los estados en los que $b(t) = 0$.

$$\tau = \sum_{j=0}^m \pi(j, 0) \quad (2.2)$$

donde $\pi(i, j)$ representa la distribución estacionaria en la cadena de Markov. Tras desarrollar y resolver la expresión anterior, la probabilidad τ en el modelo de Bianchi puede reducirse a la siguiente expresión [10]:

$$\tau = \frac{2}{1 + W_0 + pW_0 \sum_{i=0}^{M-1} (2p)^i} \quad (2.3)$$

donde p representa la probabilidad de colisión de un paquete condicionada a su transmisión, y puede expresarse como la probabilidad de que cualquier otra estación (de las $n - 1$ restantes) intente transmitir:

$$p = 1 - (1 - \tau)^{n-1} \quad (2.4)$$

Finalmente, las ecuaciones (2.3) y (2.4) forman un sistema de ecuaciones no lineal con

para definir la QoS son el retardo extremo-a-extremo, la variabilidad del retardo (*jitter*), y el porcentaje de paquetes perdidos [2].

El retardo extremo-a-extremo define el tiempo desde que se muestrea la voz del emisor hasta que se reproducen en el receptor. y representa uno de los mayores atenuantes de la calidad en VoIP. A su vez, puede descomponerse en cinco términos: (a) retardo de codificación de la señal de voz, que depende del códec utilizado; (b) de empaquetado, que representa el tiempo entre dos paquetes de voz consecutivos; (c) de red, que define el tiempo desde que se genera el paquete de voz hasta que alcanza su destino (i.e., cola, transmisión y propagación); (d) del *buffer* de *play-out*, que permite corregir la variabilidad del retardo; y (e) de decodificación de la señal de voz en el receptor. Para asegurar una calidad aceptable en la llamada, el retardo extremo-a-extremo debería ser inferior a 150 ms [36].

La variabilidad del retardo o *jitter* representa la variación media del retardo extremo-a-extremo entre paquetes consecutivos. Si el *jitter* es elevado, el oído humano es capaz de distinguir silencios indeseados, lo cual perjudica la calidad de la conversación. Idealmente, la variabilidad del retardo debería ser menor a 30 ms, aunque según el códec y configuración utilizados, este límite podría aumentarse hasta 75 ms [2]. La variabilidad del retardo puede ser corregida incorporando un *buffer* de *play-out* que almacena los paquetes de voz recibidos y los reproduce uniformemente, suavizando así el tiempo entre ellos.

Finalmente, la pérdida de paquetes representa el porcentaje de paquetes que no llegan al destino. Según [37], un porcentaje de pérdidas inferior al 3% es aconsejable en servicios de VoIP. Los efectos de las pérdidas pueden ser atenuados con mecanismos de corrección (e.g., FEC o *Forward Error Correction*) que permiten la identificación y corrección de errores en el receptor a cambio de añadir redundancia a la transmisión.

En general, la calidad de la conversación depende mayoritariamente del retardo extremo-a-extremo y las pérdidas [8]. Ambas métricas se encuentran íntimamente relacionadas con el rendimiento de la red de acceso utilizada, especialmente si se tratan de redes inalámbricas compartidas (e.g., IEEE 802.11) [8, 38–41].

En los últimos años, se han realizado numerosos estudios sobre la capacidad VoIP de las WLANs tanto experimentalmente [8,42–44], como mediante modelado analítico [6,45–50]. Estos trabajos demuestran que exceder la capacidad VoIP de una red (i.e., congestión) puede afectar negativamente al rendimiento de todas las llamadas en curso, por lo que una correcta estimación del número de llamadas es crítica para el buen funcionamiento del sistema. Además, muchos trabajos proponen técnicas de optimización para un mejor aprovechamiento de los recursos (e.g., capacidad) de la red inalámbrica y así aumentar la capacidad VoIP. Por ejemplo, algunas propuestas sugieren técnicas de optimización multicapa [51], control dinámico de la QoS [52,53], optimización de parámetros a nivel de enlace [54,55], agregación de tramas a nivel de enlace o aplicación [38,56–58], o selección dinámica de los parámetros del códec [59–63]. La mayoría de las técnicas anteriores controlan la QoS a partir de la evaluación periódica de las métricas de rendimiento anteriormente mencionadas (e.g. pérdidas, retardo), o de la calidad de la conversación.

Existen diversos métodos de evaluación de la calidad de una conversación telefónica y pueden clasificarse como subjetivos y objetivos [64, 65]. A su vez, los métodos objetivos pueden clasificarse en intrusivos y no intrusivos [66]. Los métodos subjetivos se basan en encuestas realizadas sobre un conjunto de usuarios que puntúan la calidad de llamadas de voz. Estas puntuaciones se normalizan a una escala de 1 (calidad pobre) a 5 (excelente)

conocida como MOS (*Mean Opinion Score*) [67]. En [68] se proporciona una revisión de los diferentes métodos de evaluación subjetivos.

Los métodos objetivos se basan en mediciones como las ya mencionadas métricas de rendimiento (e.g., pérdidas, retardo o *jitter*). Comúnmente, requieren la monitorización del tráfico en tiempo real o la inyección de una señal de prueba. Al contrario que los métodos subjetivos, las técnicas objetivas permiten la evaluación del rendimiento de la red en tiempo real. Los métodos objetivos intrusivos, como PAMS [69], P.861 PSQM [70] o P.862 PESQ [71], proporcionan los resultados más precisos. Sin embargo, requieren la recepción implícita de la señal, lo cual imposibilita su uso en ciertos escenarios como tareas de planificación y dimensionamiento. En cuanto a los métodos objetivos no intrusivos, el *E-model* (ITU-T G.107 [36]) se presenta como el predominante en la literatura actual [72, 73], ya que sus resultados dependen únicamente de las métricas de rendimiento de la red y las características del tráfico cursado y, en consecuencia, es el único que puede ser utilizado en la planificación y dimensionamiento de servicios VoWiFi.

El *E-model* proporciona una expresión matemática que determina la calidad de un sistema de comunicaciones, y parte de un nivel de calidad máximo del que se sustrae una serie de factores que representan las imperfecciones de la comunicación. El factor R puntúa la calidad del servicio en un rango de 0 a 100, siendo necesario un valor mínimo R_{\min} (i.e., sobre 65 según la ITU-T G.107 [36]) para garantizar la calidad de las comunicaciones [74]. Además, en [36] se proporciona una expresión que relaciona el valor del factor R con la MOS. En su forma más simple, el *E-model* puede expresarse como en (2.5):

$$R = R_0 - I_{e,eff} - I_d \quad (2.5)$$

donde R_0 representa la relación señal a ruido básica y define la calidad máxima alcanzable sin imperfecciones; y $I_{e,eff}$ define las imperfecciones efectivas asociadas al equipamiento; y, finalmente, I_d representa la pérdida de calidad asociada al retardo de las comunicaciones.

El término $I_{e,eff}$ representa las imperfecciones asociadas al códec, su compresión y las pérdidas de la red, y se puede expresar como sigue:

$$I_{e,eff} = I_e + (95 - I_e) \frac{L}{\frac{L}{BurstR} + B_{pl}} \quad (2.6)$$

donde I_e considera las pérdidas debidas a la compresión del códec, L es el porcentaje de pérdidas de paquetes debido a la red, $BurstR$ define el número medio de paquetes consecutivos que se pierden en la red (i.e., ráfagas), y B_{pl} representa la robustez del códec a las pérdidas en red.

Por último, el término I_d representa las imperfecciones debidas al retardo de las comunicaciones. Esta puede ser aproximada por la expresión propuesta en (2.7), donde $H(x)$ representa la función Heaviside (i.e., $H(x) = 0$ para $x < 0$ y $H(x) = 1$ para $x > 0$) y D (en ms) representa el retardo extremo a extremo.

$$I_d = 0.024D + 0.11(D - 177.3)H(D - 177.3) \quad (2.7)$$

Sustituyendo las ecuaciones (2.6) y (2.7) en (2.5) se obtiene una expresión que permite calcular la calidad de una conversación a partir de parámetros dependientes del códec

(e.g., B_{pl} , I_e) y otros dependientes de la calidad de la red (e.g., L , $BurstR$ y D). En las aplicaciones desarrolladas en esta tesis (Capítulos 5 y 6) se utilizarán estas expresiones como mecanismo para estimar la QoS percibida por los usuarios de VoWiFi en tiempo real.

3 Variantes del modelo analítico de Bianchi

El modelado del rendimiento de la sub-capa MAC del estándar IEEE 802.11 ha sido objeto de estudio durante las dos últimas décadas. El modelo de Bianchi [10, 11] (ver Capítulo 2) supuso un punto de inflexión en esta línea de investigación, modelando el mecanismo de acceso al medio, DCF, como una cadena de Markov bidimensional en tiempo discreto. Sin embargo, el modelo de Bianchi parte de una serie de suposiciones que **no se corresponden con un escenario realista**:

- Saturación: las estaciones disponen de tráfico para transmitir en todo momento.
- Canal ideal: se asume un medio de transmisión libre de errores, es decir, sin ruido o interferencias.
- Tráfico homogéneo: se supone que el patrón de tráfico de todas las estaciones es el mismo, lo cual es incompatible con el modo infraestructura.
- Estaciones homogéneas: se asume que todas las estaciones trabajan bajo el mismo índice de modulación y codificación (MCS o *Modulation and Coding Scheme*), es decir, transmiten a la misma tasa de bits.

El modelo original de Bianchi considera estaciones saturadas, es decir, asume que las colas de acceso siempre disponen de paquetes para transmitir. Los códecs de VoIP generan un paquete cada 10-30 ms, por lo que esta suposición no es necesariamente aceptable. Para evitar esta suposición, algunos trabajos como [12, 13, 15, 33–35] incluyen un nuevo estado de reposo gobernado por la probabilidad estacionaria de que la cola de acceso no esté vacía. Otros [14, 17–19], en cambio, distinguen entre la probabilidad anterior (utilizada entre transmisiones consecutivas), y la probabilidad de recibir un paquete durante un tiempo medio de servicio (utilizada para abandonar el estado de reposo). La distinción de probabilidades propuesta en la última técnica arroja mejores resultados ya que permite modelar con mayor precisión el tráfico de las estaciones.

En el modelo de Bianchi se asume la idealidad del canal, es decir, no se consideran errores por influencia del ruido. La suposición de idealidad no debería ser considerada aceptable

en ningún escenario realista, ya que todos los medios de transmisión inalámbricos son susceptibles al ruido. Algunos trabajos [12–14] reemplazan la probabilidad de colisión por una probabilidad de error equivalente que considera tanto los errores por ruido como por colisión. Otros trabajos, como [33–35] incluyen la probabilidad de error en el modelado del tráfico y la cola de acceso. A pesar de que ambas técnicas permiten integrar la probabilidad de error por ruido en el modelo, la segunda implica un modelado de cola más complejo que habitualmente es resuelto como una cadena de Markov adicional, lo que perjudica al coste computacional en la resolución del modelo.

La heterogeneidad del escenario puede entenderse desde dos puntos de vista: respecto al tráfico de las estaciones, y respecto a la tasa de transmisión (modulación y codificación). En VoWiFi, cada NIC transmite a una tasa diferente según la intensidad de señal recibida (RSSI) y la relación señal a ruido (SNR). Además, las aplicaciones VoIP de los usuarios pueden utilizar diferentes códecs, lo que resulta en diferentes patrones de tráfico. Muchos trabajos, como [10–12, 31, 32], sólo proporcionan ecuaciones para el caso homogéneo, lo que invalida su uso en un servicio realista de VoWiFi.

La revisión IEEE 802.11e ha sido parcialmente implementada en [31], que extiende el modelo de Bianchi para considerar EDCA en lugar de DCF (i.e., priorización de tráfico), y en [33–35], que modela la oportunidad de transmisión y el envío de ráfagas de tramas. A pesar de que ambas técnicas pueden ser aisladas para aplicarse sobre cualquier otro modelo analítico, no serán consideradas en este trabajo por simplicidad, ya que las aplicaciones VoWiFi propuestas en esta tesis no requieren necesariamente de estas características.

Finalmente, otra de las características interesantes en el despliegue y optimización de servicios VoWiFi es la provisión de expresiones para el cálculo del consumo energético de las estaciones. En [75] se descompone el cálculo del consumo energético de las NIC de una red WiFi. Sin embargo, este trabajo parte de la suposición de homogeneidad, que como se mencionó con anterioridad no es válida en escenarios realistas de VoWiFi.

En la Tabla 3.1 se ilustra el estado del arte respecto a las extensiones más representativas del modelo de Bianchi. En la tabla, se agrupan las propuestas según las características consideradas: colas no saturadas, canal no ideal, escenario heterogéneo, compatibilidad con EDCA, modelado de ráfagas (e.g. TXOP), y modelado del consumo energético.

Tabla 3.1 Clasificación de trabajos según sus simplificaciones.

Propuestas	Colas no saturadas	Canal no ideal	Heterogeneidad	Energía	EDCA	TXOP
Capítulo 4	✓	✓	✓	✓	–	–
[10, 11]	–	–	–	–	–	–
[12, 13]	✓	✓	–	–	–	–
[14]	✓	✓	✓	–	–	–
[15–19]	✓	–	✓	–	–	–
[75]	–	–	–	✓	–	–
[31, 32]	–	–	–	–	✓	–
[33–35]	✓	✓	✓	–	–	✓

A pesar de los esfuerzos anteriores, las propuestas de la Tabla 3.1 se centran en resolver alguna de las simplificaciones e ignoran u obvian el resto, por lo que no pueden ser aplicados directamente en un escenario realista. En el contexto de servicios de VoWiFi, se deben cumplir como mínimo las características representadas en las primeras tres columnas

de la Tabla 3.1: colas sin saturación, canal no ideal y heterogeneidad. Adicionalmente, en la optimización de servicios VoIP, resulta de especial interés la provisión de expresiones para la estimación del rendimiento (QoS) y del consumo energético.

A pesar de que el trabajo [14] parece cumplir estos requisitos, su propuesta no presenta expresiones para el cálculo del retardo ni del consumo energético. Por otro lado, el modelado del tráfico en este trabajo asume que la probabilidad de que la cola de transmisión no esté vacía equivale a la probabilidad de que llegue algún paquete durante un tiempo medio de servicio, y esta suposición sólo es válida en colas de un solo elemento. En consecuencia, aunque este trabajo ofrece unas bases sólidas sobre la que trabajar, los trabajos existentes no pueden ser directamente aplicados en el despliegue y optimización de servicios VoWiFi.

En resumen, el modelado del rendimiento de redes IEEE 802.11 puede considerarse un tema maduro ya que ha sido ampliamente estudiado en la literatura científica. Sin embargo, ninguna de las propuestas anteriores cubre las necesidades para la optimización de un servicio VoWiFi, (a) no satisfacen las características de un servicio VoWiFi realista, y (b) no proporcionan expresiones para estimar el rendimiento o energía del sistema.

3.1 Conclusiones

El modelo de Bianchi [10, 11] supuso un punto de inflexión en el estudio del rendimiento de la sub-capa MAC del estándar IEEE 802.11. Sin embargo, su propuesta parte de una serie de suposiciones que dificultan su uso en escenarios realistas. Por ello, este capítulo trata de utilizar las técnicas ya existentes en la literatura para construir un modelo válido para un escenario de VoWiFi. Las suposiciones comúnmente aceptadas y no válidas en el contexto de esta memoria son: condición de saturación, canal ideal, y homogeneidad.

A pesar de que muchos autores han tratado de extender el modelo de Bianchi para solventar algunas de las simplificaciones anteriores, ninguno de los trabajos satisface a su vez todas las suposiciones además de ofrecer ecuaciones para la estimación de la QoS y consumo energético del sistema.

En el Capítulo 4 se desarrolla un nuevo modelo analítico que se basa en las suposiciones realistas mencionadas anteriormente y también incluye expresiones analíticas sobre el consumo energético. Este nuevo modelo habilita el desarrollo de nuevas aplicaciones en el contexto del despliegue y optimización de servicios VoWiFi. En particular, en este trabajo se proponen, en los Capítulos 5 y 6, dos nuevas aplicaciones: el despliegue de UAVs para dar servicio de VoWiFi con QoS garantizado, y un nuevo mecanismo de control de admisión para entornos corporativos.

Parte II

Aportaciones

4 Modelo analítico para las prestaciones y consumo energético en escenarios realistas de VoWiFi

Las necesidades identificadas en el Capítulo 3 invitan a desarrollar un nuevo modelo analítico válido para escenarios realistas de VoWiFi. Este capítulo suple dichas carencias y desarrolla un nuevo modelo analítico válido para el caso anterior mediante técnicas ya existentes en la literatura. Tal como se dijo con anterioridad, un escenario realista de VoWiFi implica las siguientes características: modo infraestructura, estaciones y tráfico heterogéneos, colas no saturadas y canal no ideal.

Contribuciones Las aportaciones de este capítulo pueden enumerarse como sigue a continuación:

- Un nuevo modelo analítico de la sub-capa MAC de 802.11 válido para escenarios VoWiFi realistas.
- Expresiones para las métricas de rendimiento de la red, que permiten resolver el *E-model* propuesto en la Sección 2.3 para predecir la calidad de las conversaciones de la red VoWiFi modelada.
- Expresiones que estiman el consumo energético tanto de las estaciones como del punto de acceso.
- Un método iterativo para resolver computacionalmente el modelo analítico propuesto.

El resto del capítulo se estructura como sigue a continuación. La Sección 4.1 desarrolla el modelo analítico propuesto a partir de las técnicas ya existentes en la literatura. Las

Secciones 4.2 y 4.3 presentan un conjunto de expresiones que permiten obtener el consumo energético y las métricas de rendimiento de la red, a partir del modelo propuesto. La Sección 4.4 presenta un algoritmo válido para resolver computacionalmente el modelo, y será el utilizado en el resto de aportaciones de la tesis. Finalmente, la Sección 4.5 presenta la validación del modelo propuesto comparando sus resultados frente a simulación.

4.1 Modelo analítico

Esta sección presenta el procedimiento seguido para desarrollar un modelo analítico válido para VoWiFi. Para ello, se presentan cuatro apartados. En primer lugar se presenta la expresión elegida para calcular la probabilidad de transmisión de las estaciones. A continuación se muestra la técnica utilizada para considerar errores del canal. Luego, se relaciona el tráfico cursado por las estaciones con el modelo. Finalmente, se desarrolla el cálculo del tiempo medio de un estado en la cadena de Markov.

4.1.1 Probabilidad de transmisión

La variable central en todos los modelos analíticos basados en la propuesta de Bianchi es $\tau^{(j)}$, la probabilidad de que la j -ésima estación intente transmitir en un *slot* aleatoriamente escogido. Puesto que una de las restricciones del escenario es la heterogeneidad de las estaciones, es necesario definir el conjunto de estaciones del sistema como $\mathcal{S} \in \{1, \dots, S\}$, de modo que las variables del sistema pueden expresarse en notación vectorial, donde el elemento j corresponde a su valor para la j -ésima estación. Por ejemplo, en el caso de τ , podría expresarse como $\boldsymbol{\tau} = \{\tau^{(1)}, \dots, \tau^{(S)}\}$. En esta memoria se propone utilizar como base la expresión de τ propuesta en [17], presentada¹ a continuación:

$$\tau = \frac{1}{\eta} \frac{1}{1-q} \left(\frac{r^2 W_o}{(1-p)(1-(1-r)W_o)} - qr(1-p) \right), \quad (4.1)$$

donde

$$\begin{aligned} \eta = & (1-r) + \frac{r^2 W_o (W_o + 1)}{2(1-(1-r)W_o)} \\ & + \frac{W_o + 1}{2(1-q)} \left(\frac{r^2 q W_o}{1-(1-r)W_o} + rp(1-q) - rq(1-p)^2 \right) \\ & + \frac{p}{2(1-q)(1-p)} \left(\frac{r^2 W_o}{1-(1-r)W_o} + qr(1-p)^2 \right) \left(2W_o \frac{1-p-p(2p)^{m-1}}{1-2p} + 1 \right) \end{aligned} \quad (4.2)$$

Las expresiones anteriores hacen referencia a un conjunto de variables que permiten relacionar el modelo con los errores en el canal (p), el tráfico de las estaciones (r y q) y las características del estándar (W_o y m). A continuación se desarrolla la obtención de los mismos.

¹ Se ha invertido el significado de las variables r y q para que coincida con el resto de la literatura citada. Además, se han eliminado los superíndices de las variables para simplificar la expresión.

4.1.2 Errores en el canal

En el modelo de Bianchi [10], la probabilidad de error condicionada a la transmisión de un paquete, \mathbf{p} , sólo considera la probabilidad de colisión con otras transmisiones. En esta sección se amplía el concepto anterior para incluir la probabilidad de corrupción de un paquete por errores en el canal (e.g., ruido) siguiendo la propuesta de [12, 14]. En definitiva, si se asume que los eventos de error por colisión o ruido son independientes entre sí, cada elemento de $\mathbf{p} = \{p^{(1)}, \dots, p^{(S)}\}$ puede calcularse como la probabilidad de unión entre ambos eventos:

$$p^{(j)} = \left(1 - P_i^{(j)}\right) \cup FER^{(j)} = 1 - P_i^{(j)} + P_i^{(j)} FER^{(j)} \quad (4.3)$$

En la expresión anterior, $P_i^{(j)}$ representa la probabilidad de la j -ésima estación encuentre el canal libre, es decir, que ninguna otra estación intente acceder al canal:

$$P_i^{(j)} = \prod_{i=1, i \neq j}^S \left(1 - \tau^{(i)}\right) \quad (4.4)$$

y $FER^{(j)}$ representa la probabilidad de que los datos de una trama de longitud L , transmitida por la j -ésima estación, sufra corrupción por ruido:

$$FER^{(j)} = 1 - \left(1 - P_e^{(j)}\right)^L \quad (4.5)$$

donde $P_e^{(j)}$ define la probabilidad de error de bit equivalente y puede aproximarse como se propone en [76, 77], dependiendo de la modulación utilizada. Una vez definidas todas las expresiones asociadas a $\boldsymbol{\tau}$ y \mathbf{p} , se obtiene un sistema no lineal de $2S$ ecuaciones que puede ser resuelto numéricamente.

4.1.3 Tráfico de las estaciones

En el modelo de Bianchi [10], se asume que las estaciones siempre tienen paquetes disponibles para su transmisión (i.e., condición de saturación), lo cual resulta inválido en redes VoWiFi realistas. Para evitarlo, algunos estudios [14–19, 78, 79] proponen relacionar la tasa de llegada de paquetes a la cola ($\boldsymbol{\lambda}$) con la probabilidad de acceso τ , a través de las variables \mathbf{r} y \mathbf{q} .

El vector \mathbf{r} define la probabilidad de que llegue al menos un paquete a la cola MAC durante un estado de reposo para cada estación. En la obtención de ambos parámetros, una aproximación muy recurrente en la literatura asume que la llegada de los paquetes a la cola MAC de la j -ésima estación siguen una distribución de Poisson de media $\lambda^{(j)}$, por lo que los elementos de \mathbf{r} pueden calcularse como:

$$r^{(j)} = 1 - e^{-\lambda^{(j)}E[T]} \quad (4.6)$$

donde $E[T]$ define la duración esperada de un estado cualquiera en la cadena de Markov. El cálculo de $E[T]$ se puede realizar ponderando el tiempo medio que el sistema está en

cada estado (éxito, colisión, corrupción o reposo) con su probabilidad de ocurrencia, y será desarrollado en la Sección 4.1.4.

En cuanto al vector q , representa las probabilidades de que las colas no estén vacías tras un tiempo medio de servicio. Las propuestas encontradas en la literatura [19, 79] pueden resumirse del siguiente modo:

- Cola pequeña. La ocupación de la cola se relaciona con la probabilidad de que no haya ningún paquete disponible en un sistema $M/G/1/2$, que puede aproximarse con la expresión propuesta en [78]:

$$q^{(j)} = 1 - e^{-\lambda^{(j)}E[T]E[B^{(j)}]} \quad (4.7)$$

En el caso del tráfico VoIP, la suposición de cola pequeña resulta razonable dada la importancia del retardo de las comunicaciones [15]. Por ello y debido a su simplicidad, será la utilizada en los ejemplos de esta memoria.

- Cola infinita. La probabilidad de que haya algún paquete en una cola infinita se puede calcular siguiendo un sistema $M/G/1$ y puede calcularse como:

$$q^{(j)} = \min\left(1, \lambda E[T]E[B^{(j)}]\right) \quad (4.8)$$

- Cola arbitraria. Es posible considerar un sistema $M/M/1/K$, que asume que tanto las llegadas como las salidas de paquetes siguen una distribución de Poisson, y una cola de K elementos:

$$q^{(j)} = 1 - \frac{1}{\sum_{i=0}^{K-1} (\lambda E[T]E[B^{(j)}])^i} \quad (4.9)$$

Las expresiones anteriores hacen referencia a $E[B^{(j)}]$, que representa el número medio de fases de *back-off* que espera la j -ésima estación hasta efectuar la transmisión, y puede expresarse² como se propone en [19]:

$$E[B] = \frac{W_o}{2(1-p)} \left(\frac{1-p-(2p)^m}{(1-2p)} - 2^m p^{M+1} \right) \quad (4.10)$$

4.1.4 Tiempo medio de un estado

En la cadena de Markov, el tiempo medio de permanencia en cada estado, $E[T]$, puede calcularse siguiendo las recomendaciones de [14, 16], que pondera el tiempo medio de permanencia en cada tipo de estado (i.e., eventos) con su probabilidad de ocurrencia. Se identifican los siguientes eventos:

- Reposo, si ninguna estación intenta transmitir.
- Transmisión exitosa, cuando una única estación intenta transmitir (i.e., no hay colisión) y no ocurren errores debidos al canal.

² Observe que se han eliminado los superíndices de las variables para simplificar la expresión.

- Transmisión corrupta, si no hay colisión pero el paquete sufre errores debido al ruido del canal.
- Colisión, cuando más de una estación intenta acceder al medio en un mismo instante de tiempo (e.g., *time slot*).

A partir de los eventos anteriores, es posible calcular $E[T]$ promediando la longitud media de cada evento con su probabilidad de ocurrencia:

$$E[T] = Z_I + Z_S + Z_E + Z_C \quad (4.11)$$

donde cada uno de los términos considerados representa el producto entre la duración y la probabilidad de cada evento, y pueden calcularse como sigue a continuación.

Reposo El término Z_I representa el tiempo en reposo, y puede ser calculado multiplicando la probabilidad del evento (P_i) por la duración de un *time slot* (σ), que depende de la revisión utilizada (e.g., $\sigma = 20 \mu s$ en IEEE 802.11b):

$$Z_I = P_i \sigma \quad (4.12)$$

donde P_i puede calcularse como la probabilidad de que ninguna³ estación intente acceder al canal en un *time slot* aleatoriamente escogido.

$$P_i = \prod_{j=1}^S (1 - \tau^{(j)}) \quad (4.13)$$

Transmisión exitosa Z_S representa el tiempo invertido en transmisiones satisfactorias:

$$Z_S = \sum_{j=1}^S P_s^{(j)} (1 - FER^{(j)}) T_s^{(j)} \quad (4.14)$$

donde $T_s^{(j)}$ representa el tiempo medio que la j -ésima estación invierte en una transmisión satisfactoria. Su valor depende tanto del tamaño de los paquetes como de la revisión del estándar, y puede calcularse como:

$$T_s^{(j)} = DIFS + 2 \cdot T_{PLCP}^{(j)} + \frac{(L_H^{(j)} + L_D^{(j)})}{R_b^{(j)}} + SIFS + T_{ack} + 2\delta \quad (4.15)$$

donde $R_b^{(j)}$ representa la tasa física de la estación; *DIFS*, *SIFS* y *EIFS* definen periodos de espera entre tramas; $PLCP^{(j)}$, $L_H^{(j)}$ y $L_D^{(j)}$ representan la duración de la cabecera PLCP y la longitud en bits de la cabecera MAC y datos, respectivamente⁴; T_{ack} representa el tiempo

³ No debe confundirse con $P_i^{(j)}$, previamente definida en (4.4), que representa la probabilidad de que la j -ésima estación encuentre el canal libre.

⁴ Observe que en el caso del punto de acceso, el tamaño de los paquetes y la tasa física de transmisión debe promediarse considerando el tráfico enviado a todas las estaciones.

de transmisión de un asentimiento; y finalmente δ representa el retardo de propagación en el aire.

En (4.14) se incluye el término $P_s^{(j)}$, que representa la probabilidad de que sólo la j -ésima estación intente transmitir mientras el resto permanece en silencio:

$$P_s^{(j)} = \tau^{(j)} \prod_{k=1, k \neq j}^S (1 - \tau^{(k)}) \quad (4.16)$$

Transmisión corrupta El término Z_E considera el tiempo invertido en transmisiones corruptas por errores del canal. Puede calcularse de manera análoga al caso anterior:

$$Z_E = \sum_{j=1}^S P_s^{(j)} FER^{(j)} T_e^{(j)} \quad (4.17)$$

donde $T_e^{(j)}$ representa el tiempo medio que la j -ésima estación invierte en una transmisión de este tipo y puede ser calculada como sigue:

$$T_e^{(j)} = DIFS + T_{\text{PLCP}}^{(j)} + \frac{(L_H^{(j)} + L_D^{(j)})}{R_b^{(j)}} + EIFS + \delta \quad (4.18)$$

Colisión El tiempo invertido en colisiones, Z_C , es más complejo de representar puesto que, a pesar de que cada estación j exhibe un tiempo medio de colisión (e.g., $T_c^{(j)} = T_e^{(j)}$), cuando dos o más estaciones colisionan prevalece el tiempo de ocupación más largo, es decir, las transmisiones más lentas ralentizan a las más rápidas.

Para facilitar el cálculo de Z_C , es posible agrupar las estaciones en clases de tráfico según su tiempo medio de ocupación en un evento de colisión:

$$\mathcal{N}(i) = \left\{ j \in \mathcal{S} \mid T_c^{(j)} = T_c^{(i)}, j \notin \mathcal{N}(k), k \leq i \right\} \quad (4.19)$$

donde $\mathcal{N}(i)$ es un subconjunto de \mathcal{S} que incluye aquellas estaciones cuyo tiempo medio de colisión es $T_c^{(i)}$, sólo si no se encuentran ya en otro grupo con menor índice (i.e., $\mathcal{N}(j)$ para $j < i$). Observe que las estaciones sólo pueden pertenecer a un grupo y que algunos grupos pueden estar vacíos. El subconjunto \mathcal{E} representa los grupos no vacíos, y $N_c = |\mathcal{E}|$ representa el número de grupos no vacíos.

$$\mathcal{E} = \{i \mid \mathcal{N}(i) \neq \emptyset\}, \quad (4.20)$$

Ahora, es posible definir $\mathcal{L}(d)$ como el conjunto de estaciones cuya ocupación en caso de colisión es superior a $T_c^{(d)}$ (i.e., transmisión más lenta), y $\mathcal{H}(d)$ como el conjunto de

estaciones cuyo tiempo medio de colisión es inferior (i.e., transmisión más rápida):

$$\mathcal{L}(d) = \left\{ i \in \mathcal{S} \mid T_c^{(i)} > T_c^{(d)} \right\} \quad (4.21)$$

$$\mathcal{H}(d) = \left\{ i \in \mathcal{S} \mid T_c^{(i)} < T_c^{(d)} \right\} \quad (4.22)$$

A partir de los subconjuntos anteriores, es posible expresar la probabilidad de que al menos una estación perteneciente a la clase $d \in \mathcal{E}$ transmita:

$$P_{tx}^{\mathcal{N}(d)} = 1 - \prod_{j \in \mathcal{N}(d)} (1 - \tau^{(j)}) \quad (4.23)$$

y la probabilidad de que transmita al menos una estación de una clase de tráfico superior o inferior, respectivamente:

$$P_{tx}^{\mathcal{H}(d)} = 1 - \prod_{j \in \mathcal{H}(d)} (1 - \tau^{(j)}) \quad (4.24)$$

$$P_{tx}^{\mathcal{L}(d)} = 1 - \prod_{j \in \mathcal{L}(d)} (1 - \tau^{(j)}) \quad (4.25)$$

Dado que las clases más lentas perjudican a las más rápidas, Z_C puede ser calculado como sigue:

$$Z_C = \sum_{d=1}^{N_c} \left(P_c^{\mathcal{N}(d)} + P_c^{\mathcal{H}(d)} \right) T_c^{(d)} \quad (4.26)$$

donde $P_c^{\mathcal{N}(d)}$ representa la probabilidad de que alguna colisión tenga lugar entre dos o más estaciones de la misma clase d :

$$P_c^{\mathcal{N}(d)} = \left(1 - P_{tx}^{\mathcal{H}(d)} \right) \cdot \left(1 - P_{tx}^{\mathcal{L}(d)} \right) \cdot \left(P_{tx}^{\mathcal{N}(d)} - \sum_{j \in \mathcal{N}(d)} P_s^{(j)} \right) \quad (4.27)$$

y $P_c^{\mathcal{H}(d)}$ es la probabilidad de que las estaciones de la clase d sufran una colisión con al menos una estación de una clase superior:

$$P_c^{\mathcal{H}(d)} = P_{tx}^{\mathcal{N}(d)} \cdot P_{tx}^{\mathcal{H}(d)} \cdot \left(1 - P_{tx}^{\mathcal{L}(d)} \right) \quad (4.28)$$

Finalmente, es posible sustituir las expresiones de Z_I , Z_S , Z_E , and Z_C en la expresión (4.11) para resolver $E[T]$, dando lugar a la expresión (4.29).

4.2 Expresiones analíticas para el consumo energético

A partir del modelo analítico propuesto, es posible calcular el consumo energético asociado a la tarjeta de red inalámbrica (*Network Interface Card* o NIC) de las estaciones [75]. Para

$$\begin{aligned}
 E[T] = & \underbrace{\sigma \cdot \prod_{j=1}^S (1 - \tau^{(j)})}_{T_r} + \underbrace{\sum_{j=1}^S \tau^{(j)} \left(\prod_{k=1, k \neq j}^S (1 - \tau^{(k)}) \right)}_{T_s} (1 - \text{FER}^{(j)}) T_s^{(j)} + \\
 & \underbrace{\sum_{j=1}^S \tau^{(j)} \left(\prod_{k=1, k \neq j}^S (1 - \tau^{(k)}) \right)}_{T_E} \text{FER}^{(j)} T_e^{(j)} + \\
 & \underbrace{\sum_{d=1}^{N_c} \left(\prod_{j \in \mathcal{H}^{(d)}} (1 - \tau^{(j)}) \right) \left(\prod_{j \in \mathcal{L}^{(d)}} (1 - \tau^{(j)}) \right) \left(\left(1 - \prod_{j \in \mathcal{N}^{(d)}} (1 - \tau^{(j)}) \right) - \sum_{j \in \mathcal{N}^{(d)}} \left(\tau^{(j)} \prod_{k=1, k \neq j}^S (1 - \tau^{(k)}) \right) \right)}_{T_c} \cdot T_c^{(d)} \\
 & + \underbrace{\sum_{d=1}^{N_c} \left(1 - \prod_{j \in \mathcal{N}^{(d)}} (1 - \tau^{(j)}) \right) \left(1 - \prod_{j \in \mathcal{H}^{(d)}} (1 - \tau^{(j)}) \right) \left(1 - \left(1 - \prod_{j \in \mathcal{L}^{(d)}} (1 - \tau^{(j)}) \right) \right)}_{T_c(\text{continued})} \cdot T_c^{(d)}
 \end{aligned} \tag{4.29}$$

ello, el primer paso es identificar y clasificar los posibles eventos de una NIC según el consumo de los mismos, como se representa en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Relación entre eventos, consumos y probabilidades.

Evento	Resultado	Consumo	Probabilidad
Reposo	—	J_σ	P_i
Transmisión	Éxito	$J_{\text{tx},s}$	$P_{\text{tx},s}$
	Error	$J_{\text{tx},e}$	$P_{\text{tx},e}$
	Colisión	$J_{\text{tx},c}$	$P_{\text{tx},c}$
Recepción	Éxito	$J_{\text{rx},s}$	$P_{\text{rx},s}$
	Error	$J_{\text{rx},e}$	$P_{\text{rx},e}$
	Colisión	$J_{\text{rx},c}$	$P_{\text{rx},c}$
	Sobreescucha	$J_{\text{rx},o}$	$P_{\text{rx},o}$

Cada uno de los eventos anteriores (y su consumo) dependen de la estación observada, por lo que deben especificarse con el superíndice (j). Mediante el promedio de los eventos anteriores, es posible obtener el consumo energético medio de un evento para la j -ésima estación, como $E[J^{(j)}]$ (en Julios):

$$\begin{aligned}
 E[J^{(j)}] = & \underbrace{J_\sigma^{(j)} P_i}_{\text{eventos de reposo}} \\
 & + \underbrace{J_{\text{tx},s}^{(j)} P_{\text{tx},s}^{(j)} + J_{\text{tx},e}^{(j)} P_{\text{tx},e}^{(j)} + J_{\text{tx},c}^{(j)} P_{\text{tx},c}^{(j)}}_{\text{eventos de transmisión}} \\
 & + \underbrace{J_{\text{rx},s}^{(j)} P_{\text{rx},s}^{(j)} + J_{\text{rx},e}^{(j)} P_{\text{rx},e}^{(j)} + J_{\text{rx},c}^{(j)} P_{\text{rx},c}^{(j)} + J_{\text{rx},o}^{(j)} P_{\text{rx},o}^{(j)}}_{\text{eventos de recepción}}
 \end{aligned} \tag{4.30}$$

donde la suma de probabilidades debe ser igual a la unidad. A partir del consumo medio anterior y la duración media de los estados del sistema, se obtiene la potencia media (en

Vatios) de una estación cualquiera:

$$P^{(j)} = \frac{E[J^{(j)}]}{E[T]} \quad (4.31)$$

Finalmente, es interesante distinguir entre la potencia media consumida por el punto de acceso ($P^{(ap)}$), y el consumo medio de las estaciones ($P^{(sta)}$):

$$P^{(ap)} = \frac{E[J^{(ap)}]}{E[T]} \quad (4.32)$$

$$P^{(sta)} = \frac{\sum_{j \in \mathcal{S}, j \neq ap} P^{(j)}}{|\mathcal{S}| - 1} \quad (4.33)$$

A continuación se desarrollan las expresiones de consumo y probabilidad de los eventos incluidos en la Ecuación 4.30.

4.2.1 Consumo asociado a los eventos

El consumo de la NIC de cada estación viene dado por tres constantes: ρ_{idle} , ρ_{tx} y ρ_{rx} ; que representan la potencia en Vatios para los estados de reposo, transmisión y recepción. Cada estación puede tener sus propias constantes de consumo dependiendo del fabricante y comportamiento (e.g., punto de acceso) de la NIC.

Reposo El consumo en reposo viene dado por J_{σ} , que puede calcularse a partir de la duración de un *time slot* (σ), y su constante de consumo:

$$J_{\sigma}^{(j)} = \rho_{idle}^{(j)} \cdot \sigma \quad (4.34)$$

Transmisión El consumo de una transmisión depende de su resultado (e.g., éxito, corrupción o colisión). En cada caso, es necesario considerar el tiempo invertido en esperas (e.g., IFS y propagación) y en la transmisión o recepción de tramas (e.g., datos, asentimientos):

$$J_{tx,s}^{(j)} = \rho_{tx}^{(j)} T_{tx}^{(j)} + \rho_{rx}^{(j)} T_{ack} + \rho_{idle}^{(j)} (SIFS + 2\delta + DIFS) \quad (4.35)$$

$$J_{tx,e}^{(j)} = \rho_{tx}^{(j)} T_{tx}^{(j)} + \rho_{idle}^{(j)} (EIFS + \delta) \quad (4.36)$$

$$J_{tx,c}^{(j)} = \rho_{tx}^{(j)} \bar{T}_{tx|c} + \rho_{idle}^{(j)} (EIFS + \delta) \quad (4.37)$$

En las expresiones anteriores, $T_{\text{tx}}^{(j)}$ representa la duración media de la transmisión de una trama de datos por parte de la j -ésima estación, y T_{ack} define la duración de un asentimiento.

$$T_{\text{tx}}^{(j)} = T_{\text{PLCP}} + \frac{(L_H^{(j)} + L_D^{(j)})}{R_b^{(j)}} \quad (4.38)$$

$$T_{\text{ack}} = T_{\text{PLCP}} + \frac{L_{\text{ack}}}{R} \quad (4.39)$$

donde R_b representa la tasa física de transmisión de los paquetes (en bits/s); R es la tasa física básica a la que se transmiten los ACKs; T_{PLCP} representa la duración del preámbulo y cabecera PLCP; y L_H y L_D representan el tamaño de la cabecera MAC y datos del paquete, respectivamente.

Por simplicidad se asume que en caso de colisión prevalece el tiempo medio de la transmisión del paquete más largo en colisiones, $\bar{T}_{\text{tx}|c}$:

$$\bar{T}_{\text{tx}|c} = \frac{\sum_{d=1}^{N_c} \left[\left(P_c^{\mathcal{N}(d)} + P_c^{\mathcal{H}(d)} \right) \cdot T_{\text{tx}}^{(d)} \right]}{\sum_{d=1}^{N_c} \left(P_c^{\mathcal{N}(d)} + P_c^{\mathcal{H}(d)} \right)} \quad (4.40)$$

Recepción En recepción, los términos de consumo asociados pueden calcularse de modo similar, aunque invirtiendo los coeficientes de consumo ρ_{tx} y ρ_{rx} , y considerando el término de sobreescucha $J_{\text{rx},o}$.

$$J_{\text{rx},s}^{(j)} = \rho_{\text{rx}}^{(j)} T_{\text{rx}}^{(j)} + \rho_{\text{tx}}^{(j)} T_{\text{ack}} + \rho_{\text{idle}}^{(j)} (SIFS + 2\delta + DIFS) \quad (4.41)$$

$$J_{\text{rx},e}^{(j)} = \rho_{\text{rx}}^{(j)} \bar{T}_{\text{tx}|e} + \rho_{\text{idle}}^{(j)} (EIFS + \delta) \quad (4.42)$$

$$J_{\text{rx},c}^{(j)} = \rho_{\text{rx}}^{(j)} \bar{T}_{\text{tx}|c} + \rho_{\text{idle}}^{(j)} (EIFS + \delta) \quad (4.43)$$

$$J_{\text{rx},o}^{(j)} = \rho_{\text{rx}}^{(j)} \bar{T}_{\text{tx}|s} + \rho_{\text{tx}}^{(j)} T_{\text{ack}} + \rho_{\text{idle}}^{(j)} (SIFS + 2\delta + DIFS) \quad (4.44)$$

donde $T_{\text{rx}}^{(j)}$ representa la duración media de las tramas de datos destinadas a la j -ésima estación (e.g., $T_{\text{rx}}^{(j)} = T_{\text{tx}}^{(j)}$ si el tráfico es bidireccional y simétrico).

Finalmente, los tiempos $\bar{T}_{\text{tx}|s}$ y $\bar{T}_{\text{tx}|e}$ representan la duración media de las transmisiones en la red, condicionada a su resultado de éxito y colisión, respectivamente. Por simplicidad, se considera que los tiempos medios son independientes a la estación observada:

$$\bar{T}_{\text{tx}|s} = \frac{1}{\sum_{i=1}^S P_{\text{tx},s}^{(i)}} \cdot \sum_{i=1}^S \left(P_{\text{tx},s}^{(i)} \cdot T_{\text{tx}}^{(i)} \right) \quad (4.45)$$

$$\bar{T}_{\text{tx}|e} = \frac{1}{\sum_{i=1}^S P_{\text{tx},e}^{(i)}} \cdot \sum_{i=1}^S \left(P_{\text{tx},e}^{(i)} \cdot T_{\text{tx}}^{(i)} \right) \quad (4.46)$$

4.2.2 Probabilidad de los eventos

En modo infraestructura, la probabilidad de los eventos depende de si la estación observada es, o no, el punto de acceso. Por lo tanto, antes de comenzar es necesario identificar el punto de acceso como $j = ap$.

Reposo La probabilidad de que el sistema esté en reposo (i.e., ninguna estación transmite) la comparten todas las estaciones y viene dada por P_r , cuya expresión se aportó previamente en la Sección 4.1.4 como (4.13).

Transmisión Las probabilidades de transmisión también dependen del resultado de las mismas. Por ejemplo, una estación con peor relación señal a ruido (i.e., SNR) tendrá más probabilidad de generar transmisiones corruptas.

$$P_{\text{tx},s}^{(j)} = (1 - FER^{(j)}) \cdot P_s^{(j)} \quad (4.47)$$

$$P_{\text{tx},e}^{(j)} = FER^{(j)} \cdot P_s^{(j)} \quad (4.48)$$

$$P_{\text{tx},c}^{(j)} = \tau^{(j)} \cdot \left(1 - \prod_{i=1, i \neq j}^S (1 - \tau^{(i)}) \right) \quad (4.49)$$

donde $P_s^{(j)}$ representa la probabilidad de que la j -ésima estación haga una transmisión exitosa en un *slot* aleatoriamente escogido:

$$P_s^{(j)} = \tau^{(j)} \cdot \prod_{i=1, i \neq j}^S (1 - \tau^{(i)}) \quad (4.50)$$

Recepción En las recepciones, el comportamiento de las estaciones difieren del AP. Partiendo de las probabilidades de transmisión anteriores, la probabilidad de recibir una trama exitosa viene dada por:

$$\begin{cases} P_{\text{rx},s}^{(j)} = \sum_{i=1, i \neq j}^S P_{\text{tx},s}^{(i)}, & \text{si } j = ap \\ P_{\text{rx},s}^{(j)} = P_{\text{tx},s}^{(ap)} \cdot \frac{\lambda_{\text{rx}}^{(j)}}{\lambda^{(ap)}}, & \text{si } j \neq ap \end{cases} \quad (4.51)$$

donde $\lambda_{\text{rx}}^{(j)}$ representa la tasa de llegada de los paquetes destinados a la j -ésima estación. A partir de las probabilidades anteriores, es posible calcular la probabilidad de recibir

tramas erróneas, colisiones o sobreescucha:

$$P_{\text{rx},e}^{(j)} = \sum_{i=1, i \neq j}^S P_{\text{tx},e}^{(i)} \quad (4.52)$$

$$P_{\text{rx},c}^{(j)} = 1 - P_i - P_{\text{tx},c}^{(j)} - \sum_{i=1}^S P_s^{(i)} \quad (4.53)$$

$$P_{\text{rx},o}^{(j)} = \left(\sum_{i=1, i \neq j}^S P_{\text{tx},s}^{(i)} \right) - P_{\text{rx},s}^{(j)} \quad (4.54)$$

El término de sobreescucha que representa la recepción correcta de un paquete sin ser el destinatario. Observe que, en el caso del punto de acceso, el término $P_{\text{rx},o}$ se anula ya que en modo infraestructura es el destinatario de todos los paquetes.

4.3 Expresiones analíticas para el retardo y las pérdidas

En esta sección se proponen algunas expresiones de rendimiento que permitirán resolver el *E-model* propuesto en la Sección 2.3. Se recuerda al lector que el modelo de calidad anterior depende de dos métricas de rendimiento básicas: las pérdidas de paquetes en la red, y su retardo extremo a extremo.

La probabilidad de pérdidas, L , puede calcularse como el cociente entre la tasa de llegada de los paquetes a la cola MAC y las transmisiones exitosas:

$$L^{(j)} = 1 - \frac{\overbrace{\left(1 - FER^{(j)}\right) \tau^{(j)} \prod_{i=1, i \neq j}^S \left(1 - \tau^{(i)}\right)}^{P_s^{(j)}}}{\lambda^{(j)} E[T]} \quad (4.55)$$

Por otro lado, la expresión del retardo de los paquetes de VoIP puede calcularse si se consideran los diferentes componentes de retardo en la transmisión de los paquetes:

$$D^{(j)} = D_{\text{codec}}^{(j)} + D_{\text{queue}}^{(j)} + D_{\text{access}}^{(j)} \quad (4.56)$$

donde $D_{\text{codec}}^{(j)}$ representa el tiempo entre paquetes de VoIP (e.g., 20 ms en G.711), $D_{\text{queue}}^{(j)}$ es el tiempo de permanencia en la cola MAC, y $D_{\text{access}}^{(j)}$ define el tiempo de acceso al canal.

La suposición de cola pequeña que se introdujo en la Sección 4.1.3 permite anular el retardo asociado al tiempo de permanencia en cola, es decir, $D_{\text{queue}}^{(j)} = 0$. Por otro lado, el retardo de acceso puede ser calculado si se considera el tiempo en el proceso de *back-off* y el tiempo invertido en colisiones.

$$D_{\text{access}}^{(j)} = \underbrace{E[T] \cdot E[B^{(j)}]}_{\text{back-off}} + \underbrace{E[Y^{(j)}] \cdot \bar{T}_{\text{tx}|c}^{(j)}}_{\text{colisiones}} \quad (4.57)$$

donde $E[Y^{(j)}]$ representa el número medio de colisiones que sufre la estación j :

$$E[Y^{(j)}] = \sum_{k=0}^{M-1} k P_i^{(j)} \left(1 - P_i^{(j)}\right)^k \quad (4.58)$$

y $\bar{T}_{\text{tx}|c}^{(j)}$ representa la duración media de transmisiones de datos colisionadas en las que la j -ésima estación se encuentra involucrada. Puesto que el cálculo de esta variable puede resultar complejo, es posible aproximar este valor a la duración media de las colisiones en la red (e.g., $\bar{T}_{\text{tx}|c}^{(j)} = \bar{T}_{\text{tx}|c}$), o asumir que la mayor parte del retardo proviene de la fase de *back-off* y anular el retardo asociado a las colisiones (e.g., $D_{\text{access}}^{(j)} \approx E[T] \cdot E[B^{(j)}]$).

La calidad de una conversación de VoIP en redes IEEE 802.11 está fuertemente condicionada por el rendimiento en el canal descendente como se demuestra en [8] ya que, en entornos congestionados, las pérdidas en la cola de acceso MAC del punto de acceso son muy frecuentes. Por este motivo, es posible calcular las variables L y D de la expresión del *E-model* en (2.5) como las pérdidas y retardo en el canal descendente:

$$L = L^{(ap)} \quad (4.59)$$

$$D = D^{(ap)} \quad (4.60)$$

4.4 Resolución del modelo

El sistema de ecuaciones no lineal formado por las ecuaciones $\boldsymbol{\tau}$ y \boldsymbol{p} puede ser resuelto de forma iterativa. En el Algoritmo 4.1 se presenta un pseudocódigo para la resolución del modelo que llamaremos *Solve-VoWiFi*. Este pseudocódigo toma como entrada el conjunto de estaciones a modelar \mathcal{S} (incluyendo el punto de acceso), y los parámetros que definen cada estación a nivel físico (SNR y R_b), a nivel de aplicación (*codec* y *nfpp*), o en términos de consumo (ρ_{tx} , ρ_{rx} y ρ_{idle}). Los parámetros de *codec* y *nfpp* definen la longitud de las tramas de datos (L_D), el retardo de paquetización (D_{codec}) y la tasa de llegada de paquetes (λ) de cada estación.

El algoritmo anterior comienza con el cálculo de los tiempos de envío (T_s , T_c , T_e) y la probabilidad de error de trama (*FER*) de cada estación. A continuación, se propone un algoritmo que resuelve iterativamente las expresiones necesarias para calcular $\boldsymbol{\tau}$ hasta lograr su convergencia. Una vez obtenido el valor de $\boldsymbol{\tau}$ para cada estación, se utilizará para resolver las expresiones de calidad y energía: R , $P^{(ap)}$ y $P^{(sta)}$.

4.5 Validación del modelo

El Algoritmo 4.1 ha sido implementado en Matlab y se ha validado frente a resultados obtenidos mediante el simulador ns-3. Además, se comparan los resultados obtenidos con las propuestas más significativas de la Tabla 3.1:

```

Input:  $\mathcal{S}, \{SNR^{(j)}, R_b^{(j)}, codec^{(j)}, nfpp^{(j)}, \rho_{tx}^{(j)}, \rho_{rx}^{(j)}, \rho_{idle}^{(j)}\} \forall j \in \mathcal{S}$ 
Output:  $R, P^{(ap)}, P^{(sta)}$ 
Initialization:  $\{DIFS, SIFS, EIFS, T_{slot}\}$  from standard revision
/* Calculate occupation times and FER */
1 for  $j = 1$  to  $|\mathcal{S}|$  do
2   | calculate  $T_s^{(j)}, T_c^{(j)}, T_e^{(j)}$ ; // Eqs. (4.15),(4.18)
3   | calculate  $FER^{(j)}$ ; // Ref. [76, 77]
4 end
/* Solve 802.11 model (Chap. 4) */
5  $\tau_{next}^{(j)} = T_c^{(j)}, \forall j$ ;
6 while  $diff > \Delta$  do
7   |  $\tau^{(j)} = \tau_{next}^{(j)}, \forall j$ ;
8   | solve  $E[T]$ ; // Eq. (4.11)
9   | for  $j = 1$  to  $|\mathcal{S}|$  do
10  | | solve  $E[B^{(j)}]$ ; // Eq. (4.10)
11  | | solve  $r^{(j)}, q^{(j)}$ ; // Eqs. (4.6),(4.7)
12  | | solve  $p^{(j)}$ ; // Eq. (4.3)
13  | | solve  $\tau_{next}^{(j)}$ ; // Eq. (4.1)
14  | end
15  |  $diff = \max(|\tau_{next}^{(j)} - \tau^{(j)}|), \forall j$ ;
16 end
17 solve  $L^{(ap)}, D^{(ap)}$ ; // Eqs. (4.59),(4.60)
18 solve  $R$ ; // Section 2.3
19 solve  $P^{(ap)}, P^{(sta)}$ ; // Eqs. (4.32),(4.33)
20 return  $R, P^{(ap)}, P^{(sta)}$ ;

```

Algoritmo 4.1 *Solve-VoWiFi*: resolución del modelo VoWiFi

- *Modelo A*, que representa el modelo de Bianchi original [10]: estaciones saturadas y homogéneas, y canal ideal.
- *Modelo B*, que implementa la propuesta de [12] y extiende el modelo de Bianchi para considerar errores en el canal y estaciones no saturadas.
- *Modelo C*, sobre la propuesta de [14], que mejora el *Modelo B* al permitir modelar escenarios heterogéneos.
- *Modelo D*, que representa el trabajo [15], y considera un escenario heterogéneo, no saturado y sin errores en el canal.

Los modelos elegidos representan las propuestas más recurrentes en la literatura científica. Puesto que los modelos homogéneos no permiten representar fielmente el modo infraestructura de operación, en estos modelos se ha optado por repartir equitativamente la carga de tráfico total entre todas las estaciones (y el punto de acceso) de la red. La comparativa no incluye ninguna implementación de EDCA [31, 32] o TXOP [33–35], ya

que ninguna de las aplicaciones propuestas en esta memoria de tesis requiere de dichas características. No obstante, ambas mejoras podrían ser incorporadas al modelo desarrollado en este capítulo siguiendo la metodología descrita en estos trabajos.

El experimento propuesto tiene como objetivo comprobar la capacidad VoIP de un sistema VoWiFi bajo el estándar IEEE 802.11n. Para ello, se considera una red WiFi en modo infraestructura (i.e., heterogéneo) en el que las estaciones llaman simultáneamente a un sumidero conectado vía Ethernet al punto de acceso. Las estaciones se han configurado para que utilicen la modulación más lenta (i.e., 6.5 Mbps) y así acelerar los efectos de la congestión de la red. Por otro lado, se asume canal ideal, ya que la técnica utilizada para modelar la influencia del ruido ya ha sido validada con anterioridad en [12]. Finalmente, las conversaciones VoIP se han configurado para utilizar el códec G.711 con un intervalo de empaquetado de 20 ms.

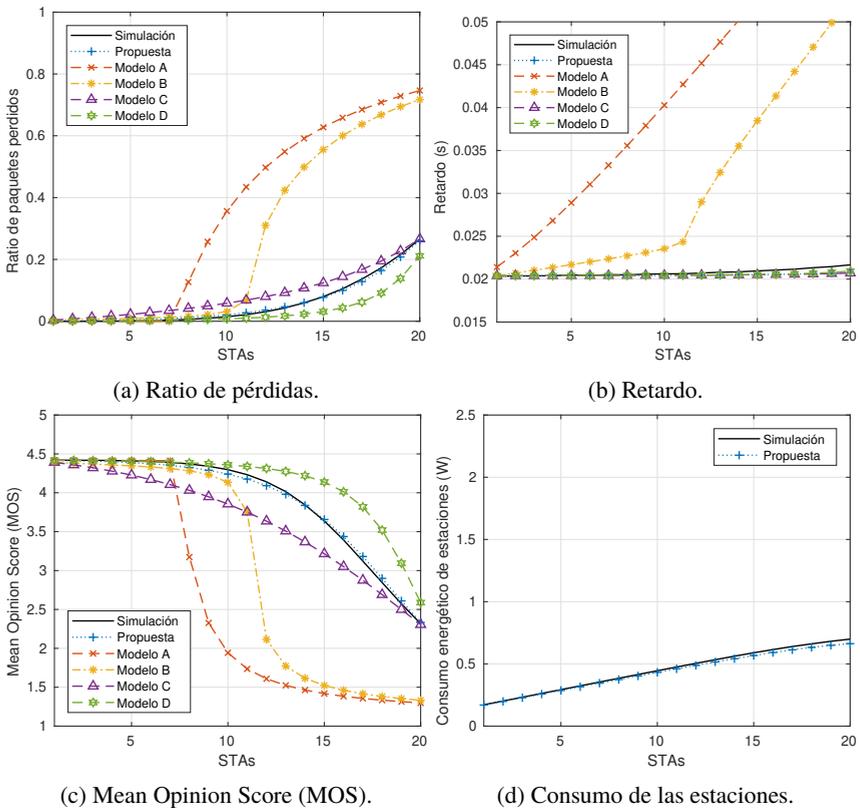


Figura 4.1 Validación del modelo analítico propuesto.

La Figura 4.1 muestra la evolución de las pérdidas, retardo, QoS y consumo energético de las estaciones conforme aumenta el número de estaciones activas. Tal como se puede observar, el modelo analítico propuesto arroja unos resultados que permiten estimar con precisión tanto la QoS como el consumo energético de un escenario VoWiFi. En concreto

se puede observar que, bajo la configuración escogida, la red WiFi es capaz de soportar hasta 15 conversaciones simultáneas (i.e., capacidad VoIP) garantizando una MOS superior a 3.5 (valor mínimo recomendado según la ITU-G.107 [36]).

Respecto a la comparativa, se puede observar que los *Modelos A y B* (homogéneos) no permiten estimar la MOS de las conversaciones, ya que los cálculos de pérdidas y retardo no se aproximan a los resultados obtenidos mediante simulación. Por otro lado, los *Modelos C y D* (heterogéneos) tampoco arrojan estimaciones precisas. Los resultados obtenidos sugieren que las expresiones utilizadas para el cálculo de $E[T]$, además de su modelo del tráfico que asume $q = r$, no permiten modelar con fidelidad un escenario realista de VoWiFi. Finalmente, ninguno de los modelos anteriores proporciona expresiones para el cálculo del consumo energético. En el caso de [75], se proporcionan expresiones para el *Modelo A* (i.e., modelo de Bianchi), por lo que queda directamente descartado debido a la incapacidad de este modelo para representar un escenario heterogéneo.

Estos resultados justifican el desarrollo del modelo propuesto en este capítulo, que será utilizado con posterioridad para desarrollar dos nuevas aplicaciones de VoWiFi.

4.6 Conclusiones

A pesar de que el modelado analítico de la sub-capa MAC del estándar IEEE 802.11 ha sido estudiado con anterioridad, las propuestas existentes en la literatura no se adecuan a un escenario realista de VoWiFi. En esta sección se presenta un modelo analítico válido para estos casos, que permite deducir la calidad de las conversaciones y el consumo energético tanto de las estaciones, como del punto de acceso.

Los resultados obtenidos validan el comportamiento del modelo, por lo que puede ser utilizado para facilitar tareas de despliegue y optimización de servicios VoWiFi. Las expresiones analíticas anteriores serán utilizadas en los capítulos que siguen en la memoria, donde se desarrollan dos nuevas aplicaciones de VoWiFi: (a) despliegue de UAVs para dar un servicio de VoIP sobre WiFi con garantías de calidad, y (b) un nuevo mecanismo de admisión para entornos corporativos.

5 Despliegue de UAVs para servicio de VoWiFi

Haciendo uso del modelo analítico del Capítulo 4, esta capítulo propone ofrecer un servicio de VoWiFi con garantías de calidad sobre una zona sin infraestructuras de comunicaciones funcionales a través del despliegue de vehículos aéreos no tripulados (UAVs o drones) equipados con puntos de acceso WiFi. Para ello, se plantea un problema de optimización del posicionamiento de los UAVs que minimiza una función objetivo según los requisitos del escenario. El problema propuesto no sólo considera la recepción de una intensidad de señal suficiente (i.e., cobertura WiFi), sino que tiene en cuenta el rendimiento de la sub-capa MAC (i.e., calidad de servicio) y el consumo energético de las comunicaciones.

5.1 Introducción

La popularidad de los vehículos aéreos no tripulados o UAVs (*Unmanned Aerial Vehicles*) ha experimentado un crecimiento significativo durante la última década. En la literatura científica se han propuesto numerosos y variados usos [80] como recolección y diseminación de información [81, 82], tareas de búsqueda y rescate, ciudades inteligentes o incluso agricultura. En particular y en lo que concierne a este trabajo, resulta de especial interés el despliegue de UAVs para proporcionar una infraestructura temporal de comunicaciones inalámbricas [83, 84].

En cuanto al despliegue de comunicaciones, las propuestas tratan la interconexión de usuarios o grupos de usuarios distantes [85], la reducción de la carga de las estaciones base [84], el despliegue de comunicaciones en situaciones de emergencia [86–88], o la cobertura de zonas de acceso limitado [89]. Las propuestas anteriores proponen enfoques muy variados: arquitecturas de red [90–92], formación de redes UAV-a-UAV [93], o redes híbridas con diferentes tecnologías inalámbricas [90, 94].

El despliegue de comunicaciones con UAVs suele plantearse como un problema de optimización que trata de minimizar el número de drones a desplegar (i.e., coste) garan-

tizando la cobertura a un conjunto de usuarios [95, 96]. Sin embargo, la mayoría de las propuestas asumen que la condición de cobertura (i.e., potencia de señal recibida) es suficiente para garantizar el servicio [97], o simplemente ignoran las características del tráfico cursado [92]. A pesar de que la suposición anterior puede ser válida en infraestructuras que incluyan mecanismos de congestión y control de la QoS (e.g., 4G, 5G), en las redes WiFi la potencia de señal recibida no es un indicador válido de la calidad, sino que esta depende del tráfico cursado en la red (i.e., congestión). En definitiva, aunque el despliegue de UAVs equipados con puntos de acceso (APs) WiFi [98, 99] y el rendimiento de estas comunicaciones [99–101] han sido objeto de estudio con anterioridad, el análisis real de la QoS ha sido siempre ignorada o simplificada.

Contribuciones En este capítulo se plantea un nuevo problema de optimización para el posicionamiento de UAVs, que minimiza el número de drones necesarios para dar un servicio de VoIP con garantías de calidad a un conjunto de usuarios conocido, tal como se ilustra en la Figura 5.1. El problema de optimización propuesto puede ser aplicado directamente para cubrir áreas (e.g., puntos de encuentro, ocio) si el número de usuarios y su posición es conocida. Las aportaciones pueden enumerarse como sigue a continuación:

- Se formula matemáticamente un nuevo problema de optimización del posicionamiento de UAVs que considera cobertura, QoS y energía en el contexto de las comunicaciones.
- Se propone el uso de los modelos analíticos presentados en el Capítulo 4 para predecir la calidad y el consumo energético.
- Se propone un método de búsqueda heurístico que resuelve el problema de optimización anterior.

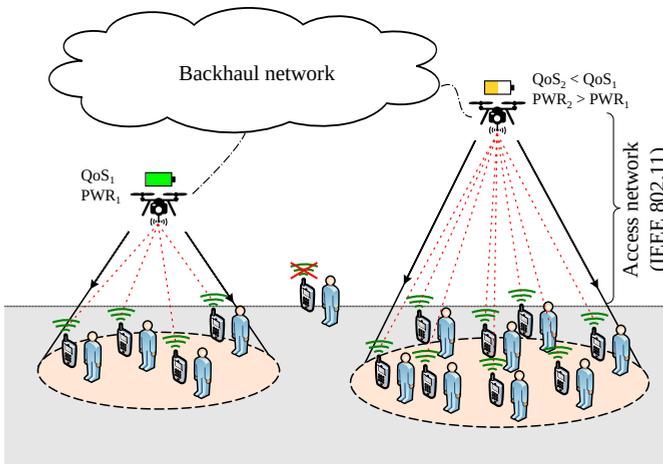


Figura 5.1 Ejemplo de red VoWiFi basada en UAVs.

5.2 Descripción del problema

En el escenario anterior, el objetivo es desplegar UAVs equipados con puntos de acceso WiFi para ofrecer un servicio de VoWiFi a un conjunto de usuarios. Para ello, se parte de las siguientes suposiciones:

- La posición de los usuarios es conocida. Además, disponen de un terminal VoIP compatible con un códec conocido y señalización estándar.
- Los terminales de los usuarios se asocian al AP WiFi (i.e., UAV) que les proporciona una mayor potencia de señal.
- Los canales seleccionados entre puntos de accesos contiguos se eligen de modo que las interferencias son despreciables.
- Existe un mecanismo de admisión de llamadas capaz de limitar el número máximo de llamadas concurrentes en cada AP.

5.2.1 Terminología

Se discretiza el espacio como se representa en la Figura 5.2, de modo que el set \mathcal{P} representa el conjunto de coordenadas en \mathbb{R}^3 que los UAVs pueden ocupar. Con el fin de facilitar la lectura, se propone seguir la siguiente terminología en el resto de la sección:

- Los usuarios se identifican a través del conjunto $\mathcal{U} = \{1, \dots, U\}$. Sus posiciones vienen dadas por $\mathbf{w}_k | k \in \mathcal{U}$, donde $\mathbf{w}_k \in \mathbb{R}^3$ representa la posición tridimensional de usuario k .
- Los UAVs se representan a través del conjunto $\mathcal{D} = \{1, \dots, D\}$ y sus posiciones mediante $\mathcal{X} = \{\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_D | \mathbf{x}_i \in \mathcal{P}, i \in \mathcal{D}, \mathbf{x}_i \neq \mathbf{x}_j | \forall j \neq i\}$.
- $\mathcal{C}(i) \subset \mathcal{U}$ define el conjunto de usuarios asociados al AP equipado en el UAV $i \in \mathcal{D}$.
- $R(i)$ representa la calidad media esperada para las conversaciones cursadas en la red desplegada por el UAV $i \in \mathcal{D}$.
- $P^{(sta)}(i)$ representa la potencia media asignada a las tarjetas de red (NIC) de las estaciones conectadas al AP del UAV i .
- $P^{(ap)}(i)$ representa la potencia media consumida por la NIC del AP montado en el UAV i .
- $B(i)$ representa la probabilidad de bloqueo de las llamadas cursadas por usuarios asignados al UAV i .
- $\bar{T}_{\text{flight}}(i)$ define la duración media de vuelo del UAV i , según su batería y consumo (e.g., vuelo y comunicaciones).

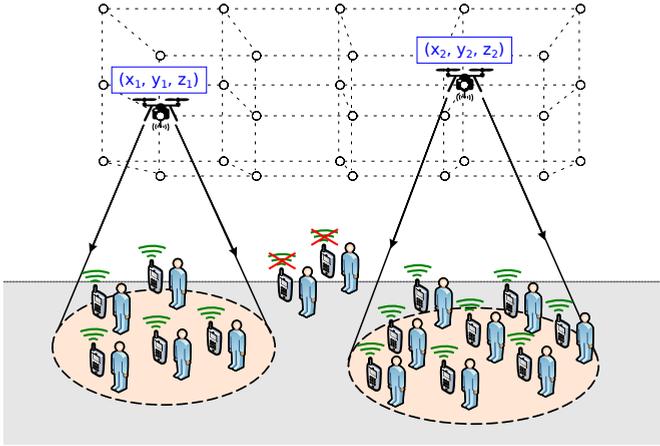


Figura 5.2 Ejemplo de posicionamiento de UAVs.

5.2.2 Definición del problema

El escenario anterior puede definirse como un problema de optimización dado por una función objetivo y un conjunto de restricciones.

$$\begin{aligned}
 \min_{\mathcal{X}} \quad & f_{\text{obj}} \\
 \text{subject to} \quad & \sum_{i=1}^D |\mathcal{C}(i)|/U \geq C_{\min} \\
 & B(i) \leq B_{\max}, \forall i \in \mathcal{D} \\
 & R(i) \geq R_{\min}, \forall i \in \mathcal{D} \\
 & \mathbf{x}_i \in \mathcal{P}, \forall i \in \mathcal{D} \\
 & D \leq D_{\max}
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Donde C_{\min} representa el ratio mínimo de usuarios que deben disfrutar del servicio, B_{\max} define la probabilidad máxima de bloqueo admisible, R_{\min} es la calidad mínima considerada que garantiza el servicio (e.g., $R_{\min} = 65$ según [36]), y finalmente D_{\max} representa el número máximo de UAVs que se pueden desplegar. El problema de optimización anterior puede particularse según los requisitos del escenario, por ejemplo:

- a) Situaciones de emergencia, donde la autonomía y la disponibilidad de los terminales de los usuarios es crítica (i.e., $C_{\min} = 1, B_{\max} = 0$). En consecuencia, para coste de despliegue equivalente (i.e., número de drones), se elegirá el posicionamiento que minimiza el consumo energético de las estaciones [20]:

$$f_{\text{obj}} = D + \frac{1}{D} \sum_{i=1}^D \frac{P^{(sta)}(i)}{P_{\text{máx}}} \tag{5.2}$$

- b) Entornos no críticos, en los que se puede introducir (y minimizar) una probabilidad de bloqueo (i.e., $B_{\max} > 0$) que reduzca, aún más, el número de UAVs a desplegar. En un segundo nivel, ante varias soluciones con el mismo número de UAVs, se elegirá el posicionamiento que maximiza la cobertura:

$$f_{\text{obj}} = D + \left(1 - \sum_{i=1}^D |\mathcal{C}(i)|/U \right) \quad (5.3)$$

- c) Escenarios de larga duración, en los que resulta interesante minimizar la tasa de despliegue de drones (e.g., UAVs/hora):

$$f_{\text{obj}} = \frac{D^2}{\sum_{i=1}^D T_{\text{Flight}}(i)} \quad (5.4)$$

5.3 Búsqueda exhaustiva

La función objetivo anterior puede utilizarse para evaluar todas las posibles soluciones hasta dar con la óptima. Para ello, se comienza evaluando todos los posicionamientos con $D = 1$ dron (i.e., $\mathbf{x}_1 \in \mathcal{P}$) y, aumentando el número de UAVs hasta dar con una solución, o alcanzar un número máximo de UAVs (D_{\max}).

El Algoritmo 5.1 presenta un pseudocódigo del algoritmo de búsqueda exhaustiva. El algoritmo recibe como entrada el conjunto de usuarios (\mathcal{U}), sus posiciones ($\{w_k\}$), el conjunto de posiciones válidas (\mathcal{P}), y las restricciones del escenario (D_{\max} , R_{\min} , C_{\min} y B_{\max}). A continuación, se buscan soluciones comprobando cada posible posicionamiento (\mathcal{P}) para cada valor de D . La evaluación de un posicionamiento se realiza a través de la función *Check* definida en la Sección 5.3.1, que devuelve el valor de la función objetivo (f_{obj}), la cobertura (C) y la calidad (R) de un posicionamiento dado.

5.3.1 Evaluación de un posicionamiento: Check

El Algoritmo 5.2 muestra el pseudocódigo de la función *Check*, encargada de evaluar un posicionamiento. En el algoritmo, cada una de las métricas se calcula mediante una función externa: *Associate*, *QoS&Energy* y *Endurance*, evaluándose cada red WiFi desplegada de forma independiente como se muestra en la Figura 5.3. A continuación se desarrollan las funciones anteriores.

Associate Esta función se encarga de asociar cada usuario al punto de acceso de un UAV que garantice que la señal recibida (RSSI) y la relación señal a ruido (SNR) superen unos umbrales mínimos ($RSSI_{\min}$ y SNR_{\min} , respectivamente). Si un usuario pudiera asociarse a varios UAVs, se escogerá aquel que garantice una mayor potencia de señal. El resultado es $\mathcal{C}(j)$, que representa el conjunto de usuarios asociado al j -ésimo UAV.

Input: $\mathcal{U}, \{w_k\}, \mathcal{P}, D_{\max}, R_{\min}, C_{\min}, B_{\max}$
Output: \mathcal{L}^* (location), f_{obj}^* (obj. function)
Initialization: $D = 0, \mathcal{L}^* = \emptyset, f_{\text{obj}}^* = \text{Inf}$

```

1 while ( $\mathcal{L}^* = \emptyset$  or  $D \leq D_{\max}$ ) do
2    $D++$ ; // increase UAVs
3   for  $\mathcal{X} \in \{\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_D \mid \mathbf{x}_i \in \mathcal{P}, \mathbf{x}_i \neq \mathbf{x}_j, \forall i, \forall j\}$  do
4      $[f_{\text{obj}}, C, R] = \text{Check}(D, \mathcal{X}, \mathcal{U}, \{w_k\}, B_{\max})$ ;
5     if ( $f_{\text{obj}} < f_{\text{obj}}^*$  and  $C \geq C_{\min}$  and  $R \geq R_{\min}$ ) then
6        $\mathcal{L}^* = \mathcal{X}$ ;
7        $f_{\text{obj}}^* = f_{\text{obj}}$ ;
8     end
9   end
10 end

```

Algoritmo 5.1 Pseudocódigo de la búsqueda exhaustiva

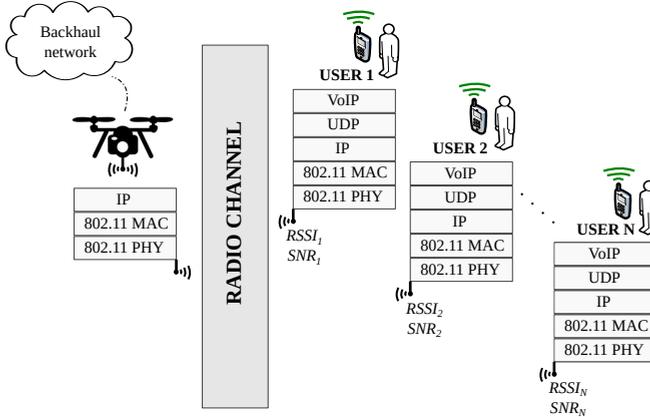


Figura 5.3 Sistema de comunicaciones de un UAV..

La RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) representa la intensidad de señal recibida y puede calcularse resolviendo el balance de potencias entre transmisor y receptor¹. Habitualmente se consideran dos componentes de pérdidas [102], *Line-of-Sight* (LoS) y *Non-Line-of-Sight* (NLoS), cuya probabilidad de ocurrencia depende tanto de la altura del UAV, como del tipo de entorno. Según el modelo en [85, 103], la probabilidad de sufrir pérdidas LoS viene dada por:

$$P_{LoS}(\theta) = \frac{1}{1 + a_1 e^{-b_1 \theta \cdot 180 / \pi + b_1 a_1}} \quad (5.5)$$

donde θ representa el ángulo de elevación en grados, y a_1 y b_1 son constantes que dependen

¹ Por simplicidad, consideramos que ambos sentidos comparten el mismo balance de potencias.

Input: $D, \mathcal{X}, \mathcal{U}, \{\mathbf{w}_k\}, B_{\max}$

Output: f_{obj}, C, R

```

1 for  $j = 1$  to  $D$  do
2    $\mathcal{C}(j) = \text{Associate}(\mathcal{U}, \{\mathbf{w}_k\}, \mathcal{X});$ 
3    $[R(j), P^{(ap)}(j), P^{(sta)}(j)] = \text{QoS\&Energy}(\mathcal{C}(j), \mathbf{x}_j, \{\mathbf{w}_k\}, B_{\max});$ 
4    $T_{\text{Flight}}(j) = \text{Endurance}(P^{(ap)}(j));$ 
5 end
6  $C = \sum_{k=1}^D |\mathcal{C}(k)|;$ 
7  $R = \min_{k=1..D} \{R(k)\};$ 
8  $f_{\text{obj}} = f_{\text{obj}}(D, U, C, P^{(sta)}, T_{\text{Flight}});$  // Eqs. (5.2), (5.3), (5.4).
```

Algoritmo 5.2 Pseudocódigo de la función *Check*

del tipo de entorno (e.g., rural, urbano). A continuación, es posible calcular $RSSI_{ij}$ como la intensidad de señal recibida (en dB) por el usuario i , ubicado en \mathbf{w}_i , asociado al punto de acceso equipado en el UAV j , en \mathbf{x}_j :

$$RSSI_{ij} = P_{\text{tx}} + G_{ij} - 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi f \cdot \|\mathbf{w}_i - \mathbf{x}_j\|}{c} \right) \quad (5.6)$$

$$- P_{\text{LoS}}(\theta_{ij}) \cdot \eta_{\text{LoS}} - (1 - P_{\text{LoS}}(\theta_{ij})) \cdot \eta_{\text{NLoS}}$$

$$G_{ij} = 10 \log_{10}(10^{G_{\max}/20} \cdot \cos^2 \theta_{ij}) \quad (5.7)$$

En la expresión anterior, P_{TX} (en dBm) es la potencia de las antenas transmisoras; G_{ij} (en dB) representa la ganancia a considerar entre el usuario i y el UAV j como se representa en (5.7); $\|\mathbf{w}_i - \mathbf{x}_j\|$ es la distancia euclidiana entre el usuario y el dron; f (en Hercios) es la frecuencia del canal; c (en m/s) es la velocidad de la luz; θ_{ij} (en Radianes) representa el ángulo de elevación entre usuario y dron; y $\eta_{\text{LoS}}, \eta_{\text{NLoS}}$ son las pérdidas asociadas a cada componente (ver en [104]); y, finalmente, G_{\max} (en dB) representa la ganancia máxima de las antenas.

A partir de la RSSI, el cálculo de la SNR puede realizarse sustrayendo la figura de ruido del receptor (F) y el ruido térmico (N) como se indica a continuación:

$$SNR_{ij} = RSSI_{ij} - F - N \quad (5.8)$$

$$N = -174 + 10 \log_{10}(C_{BW}) \quad (5.9)$$

donde C_{BW} representa el ancho de banda de canal (en MHz), tal como se especifica en la revisión del estándar IEEE 802.11 utilizada.

Finalmente, para todo $i \in \mathcal{U}$ y $j \in \mathcal{D}$, es posible definir una variable γ_{ij} que represente si la conexión entre el usuario i y el UAV j cumple las restricciones de señal ($RSSI_{ij} \geq RSSI_{\min}$ y $SNR_{ij} \geq SNR_{\min}$), de modo que pueda ser usada en el cálculo de los usuarios asociados

al dron j , como $\mathcal{C}(j)$:

$$\mathcal{C}(j) = \{i \in \mathcal{U} \mid \gamma_{ik} = 1, RSSI_{ij} > RSSI_{ik}, \forall k \neq j\} \quad (5.10)$$

QoS&Energy Esta función se encarga de evaluar tanto la QoS como el consumo energético de la red VoWiFi de un UAV. La QoS puede representarse a través del *E-model* mediante el cálculo del factor R (ver Capítulo 2), que a su vez depende de las métricas de rendimiento de la red (e.g., pérdidas y retardo). El proceso completo puede resolverse utilizando la función *Solve-VoWiFi* presentada en el Algoritmo 4.1 del Capítulo 4. Este algoritmo toma como entrada el conjunto de estaciones a modelar (\mathcal{S}), sus parámetros físicos ($SNR^{(j)}$, $R_b^{(j)}$) y de aplicación ($codec^{(j)}$, y $nfpp^{(j)}$).

En el caso de que no exista probabilidad de bloqueo ($B_{\max} = 0$), se puede asumir que \mathcal{S} incluye todas las estaciones asociadas (e.g., $\mathcal{C}(j)$), además del AP. En otro caso, es necesario calcular el número máximo de conversaciones concurrentes que el AP puede soportar con el pseudocódigo del Algoritmo 5.3, de modo que el conjunto \mathcal{S} incluiría tanto el punto de acceso como las CC_{\max} estaciones más lentas (i.e., peor caso).

Input: $|\mathcal{C}(j)|$ (set of users associated), A , B_{\max}

Output: CC_{\max} (maximum concurrent calls)

```

1 for  $cc = 1$  to  $|\mathcal{C}(j)|$  do
2   | if  $B(A, |\mathcal{C}(j)|, cc) \leq B_{\max}$  then // Eq. (5.11)
3   |   |  $CC_{\max} = cc;$ 
4   |   |  $cc++;$ 
5   | end
6 end
```

Algoritmo 5.3 Cálculo del número de conversaciones simultáneas bajo una probabilidad de bloqueo

En el cálculo de CC_{\max} se hace referencia a la función $B(A, u, cc)$, que representa la fórmula de Engset [105] y permite calcular la probabilidad de bloqueo considerando u usuarios y cc enlaces, bajo una intensidad de tráfico dada por A :

$$B(A, u, cc) = \frac{\binom{u-1}{cc} A^{cc}}{\sum_{i=0}^{cc} \binom{u-1}{i} A^i} \quad (5.11)$$

Una vez obtenido el conjunto de estaciones \mathcal{S} y sus parámetros, es posible resolver la función *Solve-VoWiFi* y obtener el factor R que representa la calidad de servicio. Además, la función anterior también devuelve el consumo energético medio del punto de acceso $P^{(ap)}$ y de las estaciones asociadas $P^{(sta)}$.

Endurance Esta función determina el tiempo medio de vuelo de los UAVs. Para ello, se calcula la energía consumida por el dron considerando dos términos: el consumo asociado

al vuelo, y a las comunicaciones:

$$E = P_{\text{Flight}} \cdot T_{\text{Flight}} + \underbrace{E_{\text{WiFi}} + E_{\text{Backhaul}}}_{E_{\text{Radio}}} \quad (5.12)$$

El término P_{Flight} representa la potencia media en Watios destinada al vuelo de los UAVs. Habitualmente, los UAV describen tres consumos diferentes según el movimiento que describan (e.g., suspensión, ascenso, desplazamiento lateral). No obstante, según [106], es posible asumir que el factor dominante es el consumo en suspensión (i.e., $P_{\text{Flight}} = P_{\text{Hover}}$). Por otro lado, la energía asociada a las comunicaciones (E_{Radio}) se puede descomponer si se consideran diferentes interfaces (e.g., WiFi, *backhaul*). Por simplificar, se asume que la energía total consumida en comunicaciones es proporcional a la utilizada a la interfaz WiFi (e.g., $1 + K$). De este modo, es posible despejar el tiempo medio de vuelo, T_{Flight} , como sigue:

$$T_{\text{Flight}} = \frac{E_{\text{Battery}}}{P_{\text{Hover}} + (1 + K) \cdot P_{\text{WiFi}}} \quad (5.13)$$

donde E_{Battery} representa la energía total disponible en la batería.

En la expresión anterior, P_{WiFi} representa la potencia consumida por el punto de acceso instalado en el UAV y corresponde al valor $P^{(ap)}$ que se obtuvo como resultado de la función *QoS&Energy*. En cuanto a P_{Hover} , puede calcularse a partir de la teoría de momentos [107]:

$$P_{\text{Hover}} = \frac{g^{\frac{3}{2}}}{\eta_{ps} r_p \sqrt{2N_R \rho_a \pi}} m^{\frac{3}{2}} \quad (5.14)$$

donde g representa la gravedad, η_{ps} es la eficiencia de propulsión, N_R es el número de rotores, r_p representa el radio de los rotores, y ρ_a representa la densidad del aire. Salvo η_{ps} , que es variable (aunque suele aproximarse por una constante) y requiere estimación o determinación experimental [106], el resto de valores son conocidos u obtenibles a partir de los manuales del fabricante.

5.4 Búsqueda heurística

A pesar de que la búsqueda exhaustiva permite hallar la solución óptima en escenarios sencillos, su uso en escenarios reales queda descartado dada su costosa resolución [20]; por ejemplo, en un escenario que requiera el despliegue de D drones sería necesario evaluar $\sum_{d=1}^D \binom{|\mathcal{P}|}{d}$ soluciones, lo cual demuestra una nula escalabilidad. A pesar de que existe gran variedad de métodos meta-heurísticos, hemos optado por utilizar un algoritmo genético dada su contrastada efectividad en la resolución de problemas de ámbito similar, como el diseño de redes [108], o el despliegue de UAVs [109, 110]. En este tipo de algoritmos, una población inicial de posibles soluciones (individuos) se evalúa y son modificados artificialmente mediante la aplicación de una serie de operadores evolutivos (e.g., selección, mutación, cruce).

El Algoritmo 5.4 presenta un pseudocódigo del algoritmo de búsqueda implementado, que comienza buscando soluciones para $D = 1$ drones, aumentando dicho valor hasta dar

con una solución sub-óptima. Para cada valor de D , el algoritmo genético busca la mejor solución que satisfaga las restricciones impuestas. Para ello, en primer lugar crea una población inicial de soluciones candidatas (individuos) y se almacena en \mathcal{I} . A continuación, cada individuo contemplado en \mathcal{I} es evaluado (f_{obj}) y se comprueba el cumplimiento de las restricciones (e.g., C, R). Tras la evaluación de cada individuo, se prepara la siguiente generación aplicando una serie de operaciones evolutivas (e.g., selección de individuos élite, *Crossover-and-Mutation, Self-Reproduction & Mutation*). Este proceso se repite hasta satisfacer un criterio de salida (e.g., el valor de f_{obj}^* no mejora sustancialmente en 20 generaciones).

```

Input:  $\mathcal{P}, \mathcal{U}, \{\mathbf{w}_k\}, D_{\max}, C_{\min}, R_{\min}$ 
Output:  $\mathcal{L}^*$  (location),  $f_{\text{obj}}^*$  (obj. value)
Initialization:  $D = 0, \mathcal{L}^* = \emptyset, f_{\text{obj}}^* = \text{Inf}$ 
1 while ( $\mathcal{L}^* = \emptyset$  and  $D \leq D_{\max}$ ) do
2    $D++$ ;
   /* Initial population */
3    $\mathcal{I} = \text{GA\_Populate}(D, \mathcal{U}, \{\mathbf{w}_k\}, \mathcal{P})$ ;
4   while !(exit criteria met) do
   /* Evaluation */
5   for individual  $i = 1$  to  $|\mathcal{I}|$  do
6      $\mathcal{X} = \mathcal{I}(i)$ ;
7      $[f_{\text{obj}}(i), C, R] = \text{Check}(D, \mathcal{X}, \mathcal{U}, \{\mathbf{w}_k\}, B_{\max})$ ;
8     if ( $f_{\text{obj}}(i) < f_{\text{obj}}^*$  and  $C \geq C_{\min}$  and  $R \geq R_{\min}$ ) then
9        $\mathcal{L}^* = \mathcal{X}$ ;
10       $f_{\text{obj}}^* = f_{\text{obj}}(i)$ ;
11    end
12  end
   /* Prepare next generation */
13   $\mathcal{I} = \text{GA\_NextGen}(\mathcal{I}, \mathcal{P})$ ;
14 end
15 end

```

Algoritmo 5.4 Algoritmo de búsqueda heurística

5.4.1 Población inicial: GA_Populate

En el Algoritmo 5.4, la primera generación de cada valor de D es generada de manera pseudo-aleatoria². Según [111], una población inicial no totalmente aleatoria, sino diseñada a propósito para que los individuos satisfagan mejor la función objetivo, puede mejorar el rendimiento del algoritmo genético. Por este motivo, utilizamos el método *k-means*, que agrupa los usuarios minimizando la distancia media al centroide del grupo (i.e., cluster) al que pertenecen, tal como se representa en la Figura 5.4. Una vez que el espacio bidimensional se ha dividido en D clusters, se crea un primer individuo cuya posición (X-Y) coincide con la de los centroides, convirtiéndola en tridimensional al añadir

² Experimentalmente, se ha elegido un tamaño de población de $p = 200$ individuos

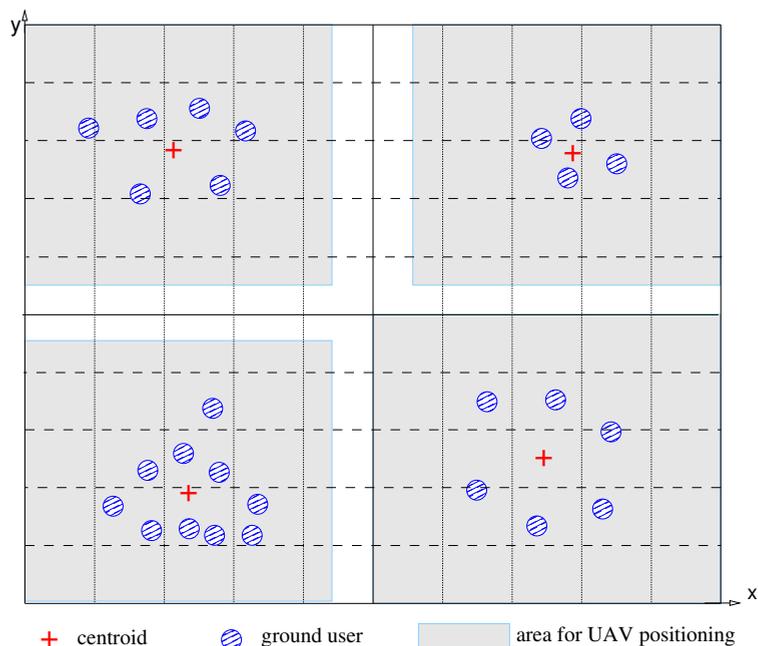


Figura 5.4 Ejemplo de uso de k -means para encontrar las regiones de cada dron para $D = 4$.

la altura media (Z) de la matriz de posiciones en \mathcal{P} . El resto de individuos ($p - 1$) se distribuyen uniformemente alrededor de los centroides. Para ello, se consideran regiones tridimensionales (i.e., cubos) alrededor de cada centroide, con un volumen igual a la d -ésima parte del volumen total del escenario (e.g., \mathcal{P}).

Para garantizar la convergencia, las regiones generadas por el k -means no se tendrán en cuenta para posteriores generaciones, de modo que los drones podrán pasar a estar ubicados en cualquier punto en \mathcal{P} sin restricción.

5.4.2 Generaciones sucesivas: GA_NextGen

Excepto la población inicial, el resto de generaciones son creadas aplicando operadores genéticos (e.g., mutación, cruce) sobre la anterior. Para ello, se parte de la evaluación de cada individuo y se crea como sigue a continuación:

- Individuos élite. El 5% de los individuos de la nueva generación serán los mejores de la anterior. De este modo, se garantiza que los mejores individuos no se pierden.
- *Crossover-and-Mutation* (CM). El 80% restante se genera aplicando la operación CM, que consiste en combinar los genes de dos individuos de la generación anterior (i.e., padres), y aplicar, con una probabilidad muy baja (p_m^{CM}), una mutación.

Para la elección de padres, se ordenan los individuos de la generación anterior según su puntuación (i.e., valor de la función objetivo). A continuación, se define una

nueva puntuación para cada individuo, $1/\sqrt{n}$, basada en su posición en el ranking, n . Finalmente, se realiza una selección estocástica uniforme de los padres. De este modo, los mejores individuos tienen mayor probabilidad de ser escogidos.

- *Self-Reproduction and Mutation (SRM)*. El resto de individuos se crean aplicando mutación sobre individuos de la generación anterior. Para ello, se escogen a partir de la selección estocástica uniforme anteriormente descrita, y se les aplica una mutación con probabilidad p_m^{SRM} . Experimentalmente, se ha comprobado que cuando $p_m^{SRM} > p_m^{CM}$, se obtiene una mejor convergencia. La mutación consiste en cambiar uno de los genes aleatoriamente.

5.5 Resultados numéricos

El Algoritmo 5.4 (i.e., búsqueda heurística) ha sido implementado en Matlab y posteriormente resuelto en una serie de experimentos. Se plantean tres escenarios diferentes según la función objetivo escogida para el problema de la Ecuación 5.1:

- Situaciones de emergencia, minimizando el consumo energético de los terminales VoWiFi de los usuarios (Ecuación 5.2).
- Entornos no críticos, en los que se busca maximizar la cobertura mientras se introduce una probabilidad de bloqueo de llamada (Ecuación 5.3).
- Escenarios de larga duración, en los que se pretende minimizar la tasa de despliegue de drones por unidad de tiempo (Ecuación 5.4).

En todos los escenarios anteriores se tomarán los parámetros por defecto mostrados en la Tabla 5.1, salvo que se especifique lo contrario.

Tabla 5.1 Parámetros de entrada por defecto.

IEEE Standard		Traffic		Constraints		Energy			
Revision	802.11n	Calls/hour	1	RSSI _{min}	-82 dBm	$\rho_{tx}^{(ap)}$	16 W	$\rho_{tx}^{(sta)}$	2.5 W
GI	800 ns	Length	180 s	SNR _{min}	20 dB	$\rho_{tx}^{(ap)}$	9.7 W	$\rho_{tx}^{(sta)}$	0.9 W
Preamble	Short	Codec	G.711	R _{min}	65	$\rho_{idle}^{(ap)}$	9.7 W	$\rho_{idle}^{(sta)}$	0.11 W
CBW	20 MHz	On/Off	CBR	C_{min}	1	$E_{Battery}$	60 Wh	K	1
Retries	7	Interval	20 ms	B_{max}	0	P_{Hover}	120 W		

5.5.1 Situaciones de emergencia

En este escenario, se utiliza la función objetivo dada por la Ecuación 5.2, que busca minimizar la energía consumida por las estaciones VoWiFi (usuarios), con los parámetros por defecto mostrados en la Tabla 5.1. Para comprobar su correcto funcionamiento y la correlación entre las características del escenario y el consumo energético, en la Figura 5.5 se propone variar el número de usuarios (de 10 a 100) en dos terrenos diferentes (100 y 10 000 m²). A priori, se espera que el consumo energético sea proporcional al número de usuarios por UAV, ya que aumentan el número de colisiones en la red de acceso WiFi. De la Figura 5.5 se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- En la superficie pequeña, en algunos incrementos de usuarios el consumo de las estaciones decrece (e.g., entre 20 y 30 usuarios en la Figura 5.5b), lo que puede parecer anti-intuitivo. Esto se debe al aumento en el número de drones (ver Figura 5.5a), lo que confirma la hipótesis de la relación proporcional entre el número de usuarios asociados a un UAV y su energía.
- Los usuarios del escenario pequeño exhiben un mayor consumo energético por debajo de los 60 usuarios. Esto se debe a que en el escenario pequeño, el número de UAVs es menor ya que no existen problemas de cobertura por atenuación de señal (i.e., menos distancia de propagación), por lo que el número de usuarios por UAV es mayor.
- Ambas curvas invierten ligeramente su comportamiento a partir de 70 usuarios. Esto se debe a que, aunque ambos igualan el número de UAVs necesarios, en el escenario de mayores dimensiones es necesario que los UAVs alcancen una mayor altura para satisfacer las restricciones de señal, por lo que las modulaciones utilizadas son más lentas y, en definitiva, el consumo energético es mayor.

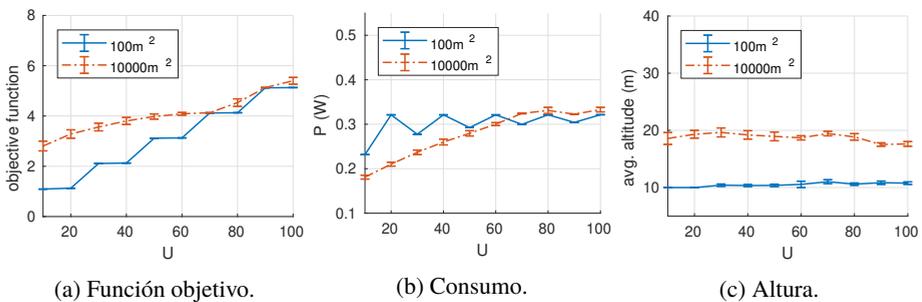


Figura 5.5 Situaciones de emergencia: función objetivo, consumo y altura media de los UAVs.

Una vez identificada la relación entre el consumo energético, la calidad de servicio y la altura media de los drones, se propone controlar el consumo energético de los siguientes modos:

- Limitando la altura de los UAVs. En este caso, se plantea un escenario de 10 000 m² y se varía el número de usuarios de 10 a 100. Además, se repite el escenario con tres límites de altura diferentes para los UAVs: $h_{\max} = \{10, 25, 40\}$ m. Los resultados mostrados en la Figura 5.6 demuestran que cuanto menor sea la altura máxima permitida, menor es el consumo energético de las estaciones ya que el número de usuarios cubiertos por UAV es menor y, en consecuencia, se necesitan más UAVs para cubrir el mismo escenario.
- Restringiendo la QoS. En este experimento, se dispone una superficie pequeña de 100 m² y se varía el número de usuarios de 10 a 100. El experimento se resuelve para tres límites de QoS diferentes: $R_{\min} = \{70, 75, 80\}$. Los resultados se ilustran en la Figura 5.7, que demuestra que cuanto mayor es la calidad exigida, menor es

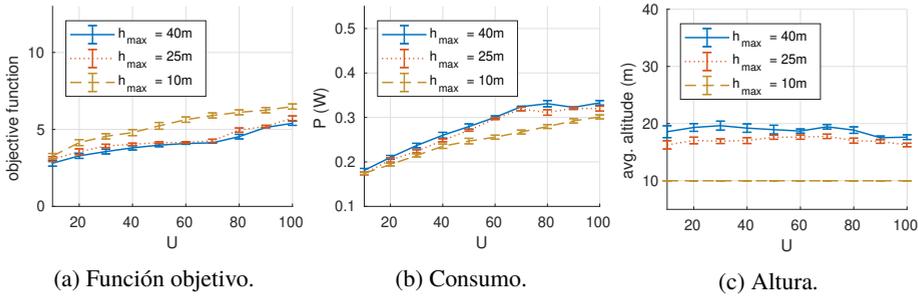


Figura 5.6 Situaciones de emergencia: restringiendo la altura de los UAVs.

el número de usuarios que puede cubrir cada UAV y, en consecuencia, menor es el consumo energético de las estaciones. Además, una mayor calidad exigida se traduce en exigir modulaciones más rápidas por lo que los tiempos de acceso al canal WiFi son menores.

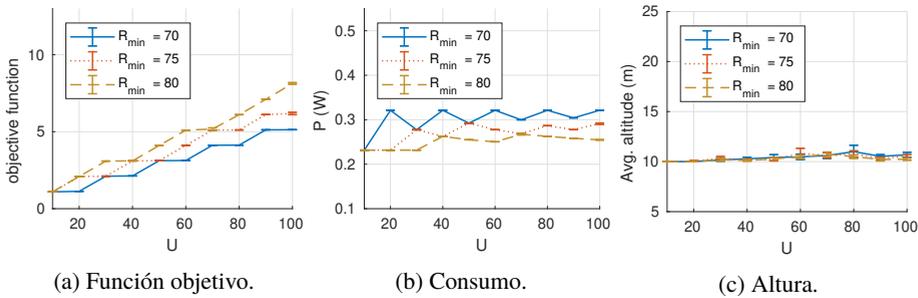


Figura 5.7 Situaciones de emergencia: restringiendo la QoS.

5.5.2 Entornos no críticos

En este escenario, se busca minimizar el número de drones desplegados incluyendo una probabilidad de bloqueo ($B_{max} = 0.05$) y maximizando el número de usuarios cubiertos ($C_{min} = 0.9$). Para ello, se propone evaluar la evolución de la función objetivo según la dispersión de los usuarios (i.e., m^2 /usuario). En la Figura 5.8 se resuelven dos escenarios: limitado en cobertura y limitado en calidad, en el que se estudian las revisiones del estándar IEEE 802.11 propuestos en la Tabla 5.2.

- Limitado en cobertura. Se varía la dispersión de usuarios de 1 a $100 m^2$ /usuario manteniendo un número fijo de $U = 100$ usuarios. En este tipo de escenarios, se espera que el número de drones aumente, principalmente, para satisfacer las condiciones de cobertura dadas por C_{min} . En la Figura 5.8a se puede observar que ante una mayor dispersión, las revisiones a 5 GHz ofrecen peores resultados debido a las pérdidas en propagación. Otro efecto observable es el impacto negativo de

usar anchos de banda de canal mayores, que también aumenta el número de UAVs a desplegar.

- Limitado en calidad. Se fija un terreno de dimensiones muy reducidas ($5\text{ m} \times 5\text{ m}$) y se aumenta el número de usuarios de 25 a 100, logrando escenarios muy densos (de 1 a $0.25\text{ m}^2/\text{usuario}$). En este tipo de escenarios se espera que el número de UAVs aumente para satisfacer las restricciones de QoS (R_{\min}). En la Figura 5.8b se ilustran los resultados, que demuestran que todas las revisiones ofrecen un comportamiento similar y que no se logra aprovechar las mejoras en velocidad de las revisiones más modernas (e.g., IEEE 802.11 ac).

En ambos escenarios, las revisiones 802.11 g/n ofrecen un buen equilibrio entre cobertura y QoS, requiriendo el menor número de drones en cualquier caso.

Tabla 5.2 Revisiones consideradas de IEEE 802.11.

Frequency	Channel Bandwidth	Revision
2.4 GHz	22 MHz	802.11b
	20 MHz	802.11g
	40 MHz	802.11n
5 GHz	20 MHz	802.11a
	160 MHz	802.11ac

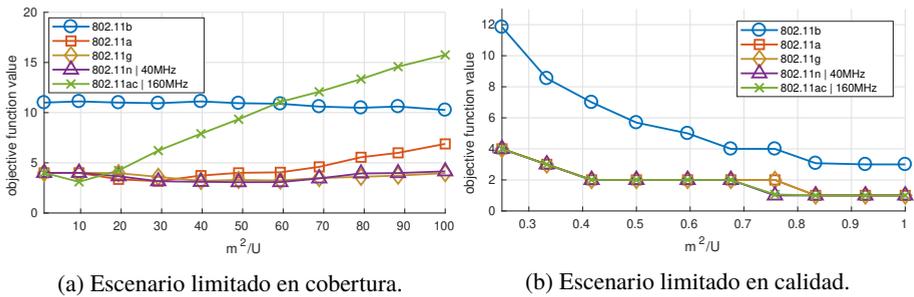


Figura 5.8 Entornos no críticos: influencia de la dispersión.

5.5.3 Escenario de larga duración

En este escenario, se utiliza la función objetivo descrita en Ecuación 5.4, que minimiza el número de drones necesarios por unidad de tiempo (e.g., UAVs/hora). En este experimento, se varía el número de usuarios (de 10 a 100) en dos terrenos (100 y $10\,000\text{ m}^2$). Además, se exige una cobertura mínima de $C_{\min} = 0.9$, manteniendo el resto de parámetros de la Tabla 5.1. La Figura 5.9 muestra los resultados obtenidos para ambos escenarios respecto a la función objetivo, consumo medio de la interfaz radio de los UAVs, y reparto del consumo total.

La Figura 5.9a muestra que los escenarios con mayor dispersión de usuarios ($m^2/\text{usuario}$) afectan negativamente a la tasa de reemplazo de drones. Además, los resultados indican

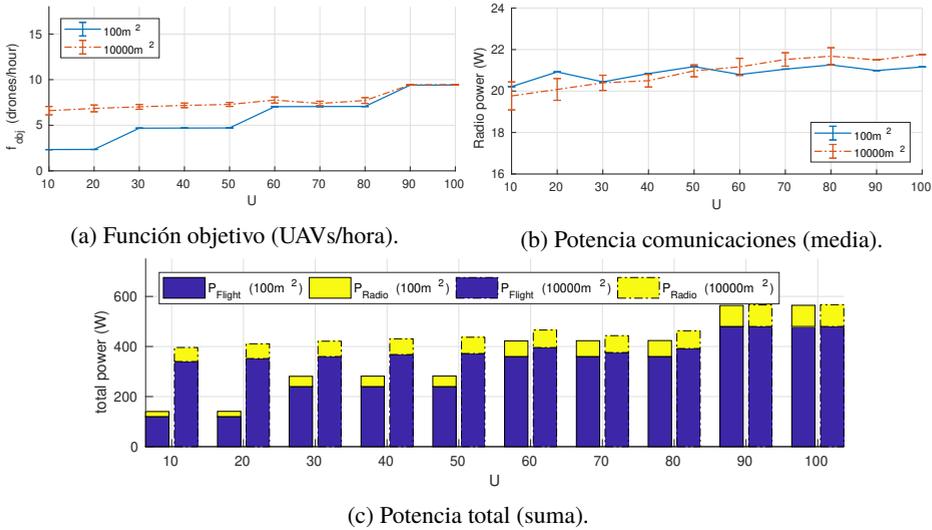


Figura 5.9 Escenario de larga duración: función objetivo y consumo.

que el tiempo medio de los UAVs, bajo los parámetros listados en la Tabla 5.1, ronda los 25 minutos.

La Figura 5.9b muestra la potencia media que los UAVs destinan a las comunicaciones inalámbricas. En esta gráfica se observan dos comportamientos:

- Por debajo de 50 usuarios, el escenario más pequeño presenta un mayor consumo. Esto se debe a que en el escenario más grande, los drones disponen de una mayor superficie sobre la que posicionarse y pueden alejarse para excluir hasta $(1 - C_{\min}) \cdot U$ usuarios, minimizando el tráfico que cursan los UAVs y su consumo.
- A partir de 50 usuarios, el comportamiento se invierte. Esto se debe a que el escenario mayor requiere una mayor altura de los UAVs y, en consecuencia, aumenta el consumo destinado a las comunicaciones (e.g., peor tasa física).

Finalmente, la Figura 5.9c representa el consumo total de todos los UAVs desplegados y su desglose de potencias (e.g., vuelo y comunicaciones). En el experimento propuesto, la potencia de las comunicaciones representa entre el 14% y 16% de la potencia total consumida, escalando con la densidad de usuarios.

5.6 Conclusiones

En esta sección se ha propuesto un nuevo problema de optimización del posicionamiento de UAVs para dar un servicio de VoWiFi con garantías de calidad. El problema propuesto minimiza una función objetivo personalizable (e.g., coste, energía) según los siguientes casos de uso: (a) situaciones de emergencia, (b) entornos no críticos, y (c) escenarios de larga duración.

Los resultados obtenidos confirman la correlación entre el consumo energético y la congestión de la red WiFi, lo que puede deberse al incremento de colisiones en el medio. Además, los resultados sugieren que la frecuencia y ancho de banda utilizados (según la revisión del estándar) influyen en la cobertura del servicio, es decir, a menor frecuencia y ancho de banda, mayor es el alcance de la señal. Finalmente, se deduce que la energía consumida por el UAV en comunicaciones representa alrededor del 15% de la potencia total consumida, por lo que minimizar este valor puede ser clave en despliegues de larga duración.

6 Control de admisión de llamada unificado

En esta sección se presenta un nuevo mecanismo de admisión de llamadas (*Call Admission Control* o CAC) para VoIP en entornos corporativos bajo un mismo dominio de gestión, válido independientemente de la red de acceso de los usuarios (i.e., WiFi, Ethernet). El sistema CAC propuesto, *Unified CAC* (U-CAC) [21], puede ser implementado en una pasarela o proxy de VoIP y sólo utiliza protocolos estándares (e.g., SIP, SNMP), de modo que no se requiere ninguna modificación en los terminales VoIP ni en los puntos de acceso.

Se presentan dos variantes del mecanismo de admisión: básico y avanzado. En el modo básico, la admisión de nuevas llamadas se basa en la disponibilidad de circuitos y en el impacto que la nueva llamada tendría en la calidad de las redes WiFi de acceso, si las hubiera. El modo avanzado, en cambio, intenta disminuir la carga de tráfico mediante la reconfiguración de las llamadas en curso, antes de rechazar la llamada. Los resultados obtenidos indican que el número de llamadas simultáneas con garantías de calidad se incrementan con el uso del U-CAC. De hecho, bajo el modo avanzado de operación, el número de llamadas simultáneas puede doblarse con respecto al modo básico.

6.1 Introducción

En su evolución, la tecnología VoIP se ha adoptado tres casos de uso principales: (a) operadores de telefonía, (b) uso doméstico a través de Internet, y (c) uso corporativo. En general, cada contexto cuenta con sus propias necesidades y ha adaptado la tecnología de VoIP para suplirlas. Respecto a su uso corporativo, antes de la llegada de VoIP las organizaciones adquirían centrales privadas automáticas (PABX) para reducir costes y ofrecer comunicaciones internas gratuitas. Los PABX incluían un CAC (*Call Admission Control*) que rechazaba llamadas si las líneas PSTN estaban ocupadas [112]. Con la llegada de VoIP, los nuevos PABX comenzaron a integrar pasarelas SIP¹ y, en consecuencia, los

¹ Según [113], más del 50% de los PABXs en el mundo soportaban VoIP en 2008.

teléfonos IP comenzaron a sustituir a los terminales convencionales como se ilustra en la Figura 6.1. La QoS en la sección cableada de la red (LAN) puede ser garantizada mediante la priorización y la reserva de ancho de banda [114] para el tráfico de voz. Sin embargo, la garantía de calidad en la sección WLAN no es trivial.

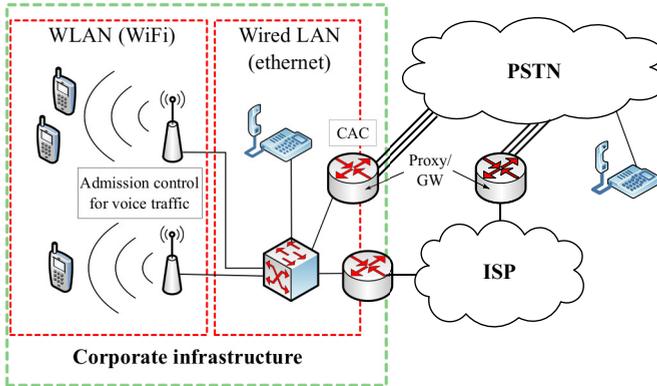


Figura 6.1 Ejemplo de uso de VoIP en dominio corporativo.

Tal como se introdujo en el Capítulo 2, la revisión IEEE 802.11e del estándar incluye nuevos mecanismos, como la priorización de tráfico [29], que permiten controlar la QoS. Sin embargo, si la carga de tráfico superase la capacidad disponible, los mecanismos anteriores no permitirían garantizar una QoS mínima, por lo que el rendimiento general de la red sería gravemente perjudicado [115, 116]. Por este motivo, el estándar define un mecanismo de control de acceso (*Access Control Mandatory* o ACM) que establece un número máximo de conexiones para prevenir la saturación [5, 117]. No obstante, el estándar no recoge ningún algoritmo que defina el número máximo de conexiones.

Durante los últimos años se han propuesto numerosos algoritmos de CAC para VoWiFi. Según la clasificación de [5], éstos pueden basarse en mediciones del rendimiento de la red, modelos analíticos, o ambos. Los algoritmos basados en mediciones observan el rendimiento de la WLAN, ya sea de forma activa [118, 119] o pasiva [120], y toman una decisión basada en el estado de la red. Por otro lado, los algoritmos basados en modelos analíticos, predicen el rendimiento de la red utilizando modelos analíticos de la sub-capacidad MAC de 802.11 [38, 54], o teletráfico [121, 122]. Algunos algoritmos basados en modelos aprovechan la predicción para optimizar parámetros de nivel de enlace [54, 55], agregar tramas [38], o controlar la tasa física de flujos de baja prioridad [55] para incrementar el número de llamadas simultáneas.

La Tabla 6.1 resume el estado del arte respecto a algoritmos de control de admisión para VoWiFi, clasificados según su naturaleza (i.e., basado en mediciones, modelos o ambos). Por otro lado, se representa las modificaciones necesarias para su implementación (e.g., terminales, puntos de acceso, etc.), así como su compatibilidad con PSTN o redes celulares. Por último, se muestran mejoras opcionales para la optimización de recursos (e.g., agregación de tramas a nivel de enlace o aplicación, etc.) y las suposiciones sobre

las características del medio y las comunicaciones. Como se puede observar en la tabla, la mayoría de las propuestas requieren la modificación de los terminales [118, 119] y/o APs [38, 54, 55, 123, 124], lo cual imposibilita su integración en infraestructuras existentes. Por otro lado, el conjunto de suposiciones realizadas en la mayoría de las propuestas invalida su uso en un entorno no controlado.

Tabla 6.1 Estado del arte de CAC para VoWiFi.

Proposals		U-CAC	[54]	[125]	[55]	[124]	[126]	[38]	[127]	[121]	[122]	[128]	[118]	[129]	[119]	[123]	[120]	
Nature	Model-based	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	✓	✓	
	Measure-based	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Mods.	Endpoints	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	✓	-	✓	
	Access Points	-	✓	-	✓	✓	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	
	GW/Proxy	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Dedicated element	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	✓	-	-	-	
	Unspecified	-	-	✓	-	-	✓	-	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	
PSTN support		✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	
Cellular support		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	
Opt.	Application-level	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	
	Link-level	-	✓	-	✓	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Multi-rate stations		✓	-	-	-	-	✓	-	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓
Heterogeneous VoIP		✓	-	-	✓	✓	✓	-	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Channel errors		✓	-	✓	-	-	✓	-	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓

Contribuciones En esta sección se propone un sistema que integra un control de admisión de llamadas único para las WLANs y PSTN para el uso corporativo de VoIP. El sistema propuesto se ha llamado *Unified CAC* (U-CAC) y sus principales características son:

- La función de admisión reside en una misma entidad que puede ser integrada en la pasarela o proxy VoIP. No es necesario incluir un nuevo dispositivo como en [128, 129].
- Su implementación no requiere cambios en los terminales VoIP o en los puntos de acceso, ya que se utilizan protocolos estándares comúnmente soportados.
- La admisión de nuevas llamadas se basa en una estimación de la calidad de las conversaciones considerando la aceptación de la nueva llamada. Utilizamos un modelo analítico asistido por mediciones (e.g., SNR, tasa física), que obtiene la información necesaria tanto de los mensajes SIP, como de los puntos de acceso involucrados en la llamada.
- U-CAC incluye dos modos de operación. En el modo básico, se aceptan o rechazan llamadas según su impacto en la calidad de las conversaciones en curso. En el modo avanzado, se trata de reconfigurar las llamadas en curso para reducir el tráfico de la red antes de descartar una nueva llamada.

Los resultados de este trabajo pueden ser directamente aplicados a escenarios corporativos en los que todos los elementos involucrados se encuentran bajo un mismo dominio de gestión.

6.2 Escenario de aplicabilidad y visión general

En la Figura 6.2 se ilustra un ejemplo de infraestructura VoIP en un escenario corporativo. En la figura, se clasifican los elementos de la red en tres capas:

- Capa VoIP. Representa el nivel de aplicación del servicio VoIP. Los elementos en esta capa son los terminales VoIP, y una pasarela o proxy VoIP que cursa los mensajes de señalización SIP e interopera con PSTN. Los terminales de VoIP implementan un conjunto de códecs conocidos anunciados en los mensajes SIP (e.g., INVITE, 200 OK) mediante SDP (*Session Description Protocol*) [130].
- Capa WLAN. En este nivel se encuentran los puntos de acceso y sus controladores. Se presupone que ambos implementan el popular protocolo SNMP (*Simple Network Management Protocol*) [131] y una MIB (*Management Information Base*) que ofrezca información a nivel físico (e.g., SNR y MCS).
- Capa LAN. Esta capa se compone de conmutadores Ethernet de alta velocidad y un router WAN. Dadas las velocidades alcanzadas hoy en día en las redes Ethernet, es posible asumir que el impacto de las LAN cableadas en la QoS de VoIP es inapreciable o, en cualquier caso, puede ser considerada como una constante.

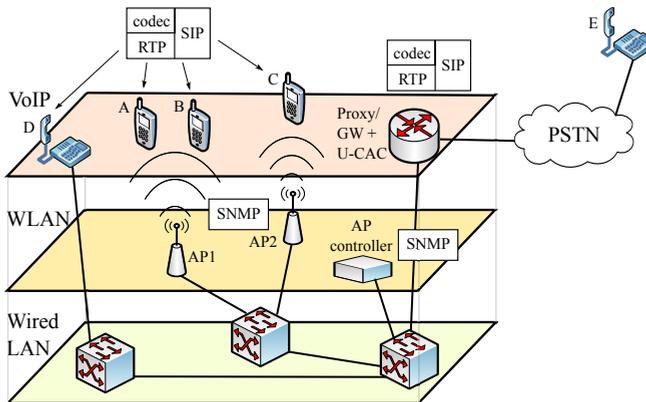


Figura 6.2 Capas de QoS en entornos corporativos.

6.2.1 Visión general del U-CAC

El U-CAC se ha diseñado para ser implementado en la pasarela o proxy VoIP². De este modo, el sistema puede observar, modificar o generar mensajes SIP enviados desde o hacia los elementos de la capa VoIP; y también comunicarse con los elementos de la capa WLAN (puntos de acceso o controladores) mediante SNMP. En la Figura 6.3 se representan los bloques internos del U-CAC:

² El software más popular (e.g., asterisk [132], freePBX [133]) incluye métodos orientados a la integración de código personalizado externo.

- *Call Context*. Este componente observa los mensajes SIP generados o recibidos por los terminales VoIP, por lo que puede detectar el inicio o finalización de llamadas [134]. Cuando se detecta una nueva llamada (1), se extrae información sobre la llamada (e.g., origen, destino, parámetros). Luego, se solicita al bloque *APQuery* que obtenga información sobre las estaciones asociadas a los APs involucrados en la nueva llamada. Tras obtener dicha información (4), se actualiza en la base de datos (5).
- *APQuery*. Este bloque es responsable de obtener información de capa física de las estaciones afectadas desde los puntos de acceso involucrados en una llamada. A través de SNMP, se obtienen (3) todos los AP(s) involucrados en una nueva llamada. Luego, si aplica, se pregunta a dichos AP(s) información sobre la SNR y la tasa física utilizada.
- *Database*. Esta base de datos guarda información sobre las llamadas en progreso o pendientes. Para cada llamada, se almacena su información (e.g., origen, destino, contenido, AP(s) involucrados, SNR y tasa física). El algoritmo de decisión utilizará posteriormente esta información.
- *CAC decision*. Cada llamada entrante ejecuta (6) el algoritmo de decisión, que utiliza un modelo analítico que predice la calidad resultante si se aceptase la llamada. El algoritmo toma una decisión basado en la disponibilidad de líneas PSTN (CAC tradicional), y la QoS resultante que se obtendría si se aceptase la nueva llamada. La decisión tomada se comunica a los terminales mediante mensajes SIP (7).

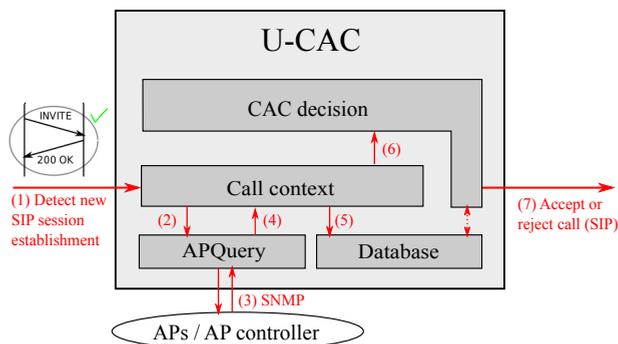


Figura 6.3 Componentes del U-CAC.

6.2.2 Ejemplo básico de operación

En la Figura 6.4 se presentan dos ejemplos básicos del U-CAC haciendo referencia a los terminales representados en la Figura 6.3.

La Figura 6.4a ilustra el primer caso (desde A hasta E). El bloque *Call Context* (1) detecta una llamada hacia un destino PSTN y se espera hasta que los mensajes Q.931 confirmen que la llamada se ha aceptado. Luego, los AP(s) involucrados en la llamada se consultan mediante SNMP para obtener información de capa física sobre las estaciones

asociadas (3). Esta información es devuelta al bloque *Call Context*, el cual actualiza la base de datos (5). Finalmente, el algoritmo de decisión es ejecutado (6) y, tras aceptar la llamada, los mensajes SIP continúan hasta completar el establecimiento.

La Figura 6.4b muestra otro ejemplo en el que una llamada entre los terminales A y C (ambos VoWiFi) es rechazada. El U-CAC identifica una nueva llamada entrante (1) y, tras extraer la información adscrita, se sondean los APs involucrados mediante SNMP (3). Esta información se devuelve al bloque *Call Context* (4) y se actualiza la base de datos de llamadas (5). Finalmente, se ejecuta el algoritmo de decisión (6). En este caso, la llamada es rechazada generando un mensaje SIP CANCEL hacia la entidad llamada, y un mensaje 480 Temporary Unavailable hacia la entidad llamante.

A pesar de no mostrarse en la Figura 6.4, el bloque *Call Context* también identifica la finalización de las llamadas, reflejando los cambios en la base de datos.

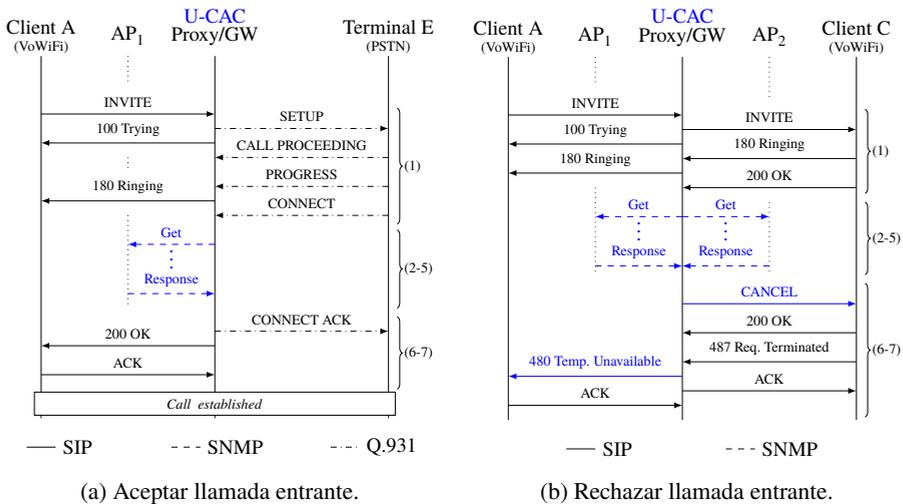


Figura 6.4 Ejemplo de señalización en U-CAC.

6.3 Algoritmos de decisión

Tal como se mencionó con anterioridad, se presentan dos variantes del algoritmo: modo básico, que decide si aceptar o no una llamada según la calidad de servicio resultante; y modo avanzado, que antes de rechazar una llamada trata de reducir el tráfico de las llamadas en curso mediante su reconfiguración.

6.3.1 U-CAC: modo básico

El Algoritmo 6.1 muestra un pseudocódigo del algoritmo de decisión en su modo básico de operación. En el pseudocódigo, los AP(s) asociados con el origen y destino de la llamada (NULL si no existen) se representan por AP_s y AP_d respectivamente, y Ω_s y Ω_d representan el conjunto de llamadas en curso en los respectivos APs.

El algoritmo comienza comprobando la disponibilidad de circuitos disponibles en el caso de que una nueva llamada se destine a PSTN. Luego, se llama la función *Solve-VoWiFi* (ver Algoritmo 4.1 del Capítulo 4) para estimar la calidad de servicio resultante si se aceptase la nueva llamada. Si dicha calidad es aceptable ($R \geq R_{\min}$), la nueva llamada se acepta, rechazándola en caso contrario.

```

Input:  $AP_s, AP_d, \Omega_s, \Omega_d$ , caller, callee,  $R_{\min}$ 
Output: response (i.e., 200 OK or 480 Temporary unavailable)
Initialization :  $R_s = R_{\min}, R_d = R_{\min}, SpareCircuit = True$ 
1 if callee is PSTN and no available circuits then
2 |    $SpareCircuit = False$ ;
3 else
4 |   if  $AP_s \neq NULL$  then
5 |     | if  $AP_d \neq NULL$  then
6 |       | if  $AP_s = AP_d$  then
7 |         |    $R_s = Solve-VoWiFi(\Omega_s \cup caller \cup callee)$ ;
8 |         |   else
9 |         |      $R_s = Solve-VoWiFi(\Omega_s \cup caller)$ ;
10 |        |      $R_d = Solve-VoWiFi(\Omega_d \cup callee)$ ;
11 |        |   else
12 |        |      $R_s = Solve-VoWiFi(\Omega_s \cup caller)$ ;
13 |        |   else if  $AP_d \neq NULL$  then
14 |        |      $R_d = Solve-VoWiFi(\Omega_d \cup callee)$ ;
15 if  $R_s \geq R_{\min}$  and  $R_d \geq R_{\min}$  and  $SpareCircuit$  then
16 |   /* Accept call */
17 |   response = 200 OK;
18 else
19 |   /* Reject call */
20 |   response = 480 Temporary unavailable;
21 return response;

```

Algoritmo 6.1 U-CAC: modo básico

6.3.2 U-CAC: modo avanzado

La idea que persigue el modo avanzado de operación es que antes de rechazar una nueva llamada, el U-CAC intenta reducir el tráfico de las WLAN haciendo que las llamadas en curso cambien a un códec con mayor compresión, o aumentando el número de tramas de voz en cada paquete. Todos los cambios pueden anunciarse mediante SIP y, al reducir el tráfico ofrecido a la red, las probabilidades de aceptar la nueva llamada son mayores.

La Figura 6.5 muestra un ejemplo del modo avanzado de operación. En este ejemplo, se presupone un intento de llamada desde el terminal A al D. En el ejemplo, se solicita a otros clientes VoWiFi asociados al API que modifiquen su configuración de llamada. Finalmente, la nueva llamada es aceptada con una configuración distinta a la propuesta originalmente (G.729 y 5 tramas de voz por paquete). Tras confirmarse los cambios, la

nueva llamada es aceptada.

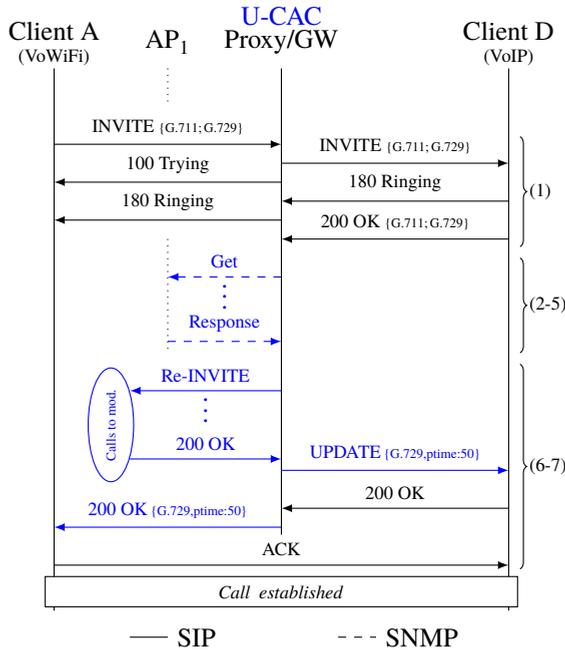


Figura 6.5 U-CAC: modo avanzado (aceptar tras reconfigurar).

Dado que una mayor compresión o retardo implica un impacto negativo en la calidad ofrecida, el algoritmo intenta minimizar el número de cambios en las llamadas. El procedimiento realizado por el algoritmo se representa en forma de pseudocódigo en el Algoritmo 6.2. Para una llamada i , $codec^{(i)}$ y $nfp^{(i)}$ representan su códec y número tramas de voz por paquete. El algoritmo comienza similar al modo básico de operación, comprobando la disponibilidad de líneas PSTN, localizando y actualizando la información de los AP(s) involucrados y estimando su calidad R si se aceptase la nueva llamada. Si la restricción de calidad no se cumpliera, el algoritmo selecciona una de las llamadas al azar e intenta reconfigurar su códec y agregación de entre los disponibles según el contenido SDP. Este proceso se repite hasta que la calidad mínima es garantizada y se acepta la nueva llamada, o se agotan todas las posibilidades y finalmente se rechaza sin modificar ninguna llamada en curso.

6.4 Resultados

En esta sección se analiza el rendimiento del U-CAC mediante simulación. Se prueba cómo el U-CAC puede ofrecer garantías de calidad de servicio al rechazar aquellas llamadas que puedan perjudicar al rendimiento general de la red, y se compara su rendimiento con la ausencia de CAC.

```

Input:  $AP_s, AP_d, \Omega_s, \Omega_d$ , caller, callee,  $R_{\min}$ 
Output: response (i.e., 200 OK or 480 Temporary unavailable)
Initialization:  $R_s = R_{\min}, R_d = R_{\min}, SpareCircuit = True$ 
/* Analogous to Algorithm 6.1 */
1 if callee is PSTN and no available circuits then
2   |  $SpareCircuit = False$ ;
3 else
4   | if  $AP_s \neq NULL$  then
5     | if  $AP_d \neq NULL$  then
6       | if  $AP_s = AP_d$  then
7         |  $\Omega'_s = \Omega_s \cup \text{caller} \cup \text{callee}$ ;
8         | else
9           |  $\Omega'_s = \Omega_s \cup \text{caller}$ ;
10          |  $\Omega'_d = \Omega_d \cup \text{callee}$ ;
11        | else
12          |  $\Omega'_s = \Omega_s \cup \text{caller}$ ;
13        | else if  $AP_d \neq NULL$  then
14          |  $\Omega'_d = \Omega_d \cup \text{callee}$ ;
15        |  $R_s = \text{Solve-VoWiFi}(\Omega'_s)$ ;
16        |  $R_d = \text{Solve-VoWiFi}(\Omega'_d)$ ;
17        | /* For each involved Access Point */
18        | for  $n \in \{s, d\}$  do
19          | if  $AP_n \neq NULL$  then
20            |  $\Omega = \Omega'_n$ ; // Calls to be optimized
21            | while  $R_n < R_{\min}$  and  $\Omega \neq \emptyset$  do
22              |  $i = \text{choose random call in } \Omega$ ;
23              | if  $nfpp^{(i)} < 5$  then
24                |  $nfpp^{(i)} = nfpp^{(i)} + 1$ ;
25                | else if lower bandwidth codec av. then
26                  |  $\text{change codec}^{(i)}$ ;
27                  |  $\text{reset } nfpp^{(i)}$ ;
28                | else
29                  |  $\Omega = \Omega - \{i\}$ ; // Call optimized
30                |  $R_n = \text{Solve-VoWiFi}(\Omega'_n)$ ;
31              | end
32            | end
33          | end
34        | if  $R_s \geq R_{\min}$  and  $R_d \geq R_{\min}$  and  $SpareCircuit$  then
35          | /* Accept call */
36          | distribute new settings to all calls;
37          | response = 200 OK;
38        | else
39          | /* Reject call */
40          | response = 480 Temporary unavailable;
41        | return response;

```

Algoritmo 6.2 U-CAC modo avanzado

A pesar de que los trabajos mostrados en la Tabla 6.1 no se diseñaron para trabajar en la pasarela o proxy VoIP, se ha decidido comparar el U-CAC con el CAC propuesto en [38]³, llamado AFA-CAC, dado sus similitudes con el modo avanzado del U-CAC (i.e., reducción del tráfico de la red, uso de modelos analíticos). La optimización del tráfico es llevada a cabo mediante la agregación de tramas a nivel de enlace (i.e., MSDU, MPDU). Por tanto, una comparativa entre el modo avanzado del U-CAC y AFA-CAC puede ser interesante no sólo para destacar los beneficios del U-CAC, sino para mostrar las ventajas de reducir el tráfico a nivel de aplicación (códec y tramas de voz por paquete) en lugar de a nivel de enlace (MSDU, MPDU) en términos de efectividad y simplicidad.

6.4.1 Metodología y parámetros

Se define un escenario en el que un conjunto de estaciones VoWiFi realizan llamadas a usuarios PSTN. En él, se estudia el rendimiento con las siguientes configuraciones: a) U-CAC (modo básico), b) U-CAC (modo avanzado), c) AFA-CAC, y d) sin CAC.

Los algoritmos de CAC anteriores se han implementado en el simulador ns-3 como una entidad lógica independiente con capacidad de aceptar, rechazar o modificar cualquier llamada. Durante la simulación, la calidad (R) es evaluada cada 5 segundos según las pérdidas y retardo experimentadas. Según su calidad, cada llamada se clasifica como fallida si la calidad cae por debajo de un umbral ($R < R_{\min}$) durante dos muestras consecutivas, o exitosa en caso contrario. Finalmente, se define el número de llamadas satisfactorias como:

$$Success [\%] = 100 \cdot \frac{Calls_{succeeded}}{Calls_{accepted} + Calls_{rejected}} \quad (6.1)$$

donde $Calls_{succeeded}$ representa el número de llamadas exitosas, $Calls_{accepted}$ el número de llamadas aceptada y $Calls_{rejected}$ las llamadas rechazadas.

En la simulación, se varía el número de terminales VoWiFi (de 10 a 130) y se disponen alrededor del punto de acceso formando un círculo a una distancia de 5 metros. Cada usuario VoWiFi realiza una llamada a una entidad conectada vía Ethernet al punto de acceso, que representará un usuario PSTN.

Cada estación VoWiFi implementa el estándar 802.11n, y está configurada para trabajar en la modulación más lenta (i.e., 6.5 Mbps) para acelerar los efectos de saturación de la red. Además, cada terminal dispone de la lista de códecs mostrada en la Tabla 6.2. Ambos códecs son comunes en dispositivos comerciales (e.g., Grandstream WP820, Spectralink Series 84), además de ser frecuentemente comparados y estudiados en la literatura [50, 74]. Mientras que G.711 ofrece una mayor calidad al evitar compresión o retardos adicionales, G.729 está diseñado para funcionar bajo un ancho de banda limitado incluyendo compresión, lo que limita la calidad.

Se ha simulado el escenario durante 1 hora (con 10 repeticiones para generar un intervalo de confianza del 95%), durante el cual las estaciones realizan 5 llamadas de 3 minutos de duración distribuidas aleatoriamente a lo largo de la simulación. La frecuencia y duración

³ Se ha implementado el algoritmo propuesto en [38], pero utilizando la misma expresión de τ que en U-CAC para realizar una comparativa más justa.

Tabla 6.2 Listado de códecs disponibles.

Codec	Priority	Frame size	I_e	B_{pl}	n_{jpp}	
					Default	Max.
G.711	1	80 B	0	25.1	2	5
G.729	2	10 B	10	19	2	5

de las llamadas, que definen la intensidad de tráfico, ha sido elegida para observar la influencia del CAC en un rango lógico de usuarios.

6.4.2 Resultados

La Figura 6.6 muestra el porcentaje de llamadas exitosas (ver ecuación 6.1) para cada mecanismo de CAC. Sin control de admisión, el porcentaje desciende de 100% a 5% cuando el número de usuarios asciende de 30 a 70. Observe que, con 80 usuarios, todas las llamadas fallarían sin el uso de CAC. Este porcentaje, en cambio, desciende a 40%, 20% y 0% con el uso del U-CAC (modo básico), AFA-CAC, y U-CAC (modo avanzado), respectivamente. Esto demuestra que, en general, los mecanismos de CAC mejoran la capacidad de la red para ofrecer garantías de QoS a un mayor número de clientes inalámbricos.

Desde otra perspectiva, si observamos un porcentaje de éxito concreto (por ejemplo, 90%), el modo básico del U-CAC puede soportar hasta 50 usuarios, mientras que AFA-CAC y el modo avanzado del U-CAC pueden gestionar hasta 65 y 130 usuarios, respectivamente. Los resultados sugieren que el modo avanzado del U-CAC ofrece el mejor rendimiento de entre las alternativas probadas.

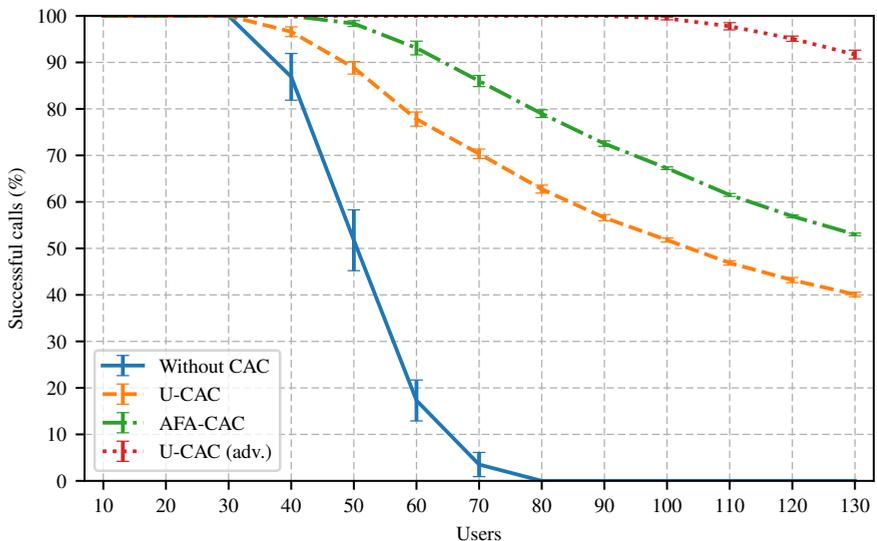
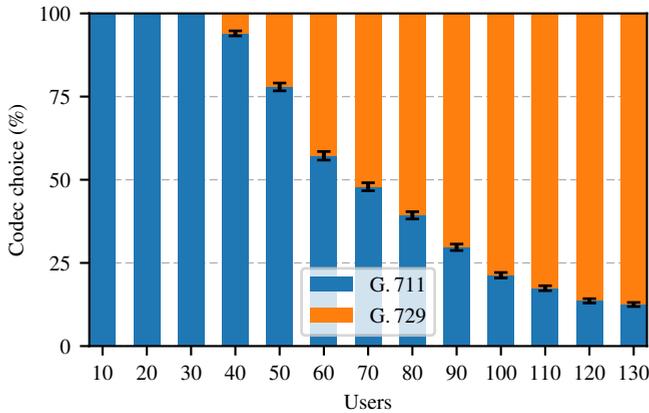
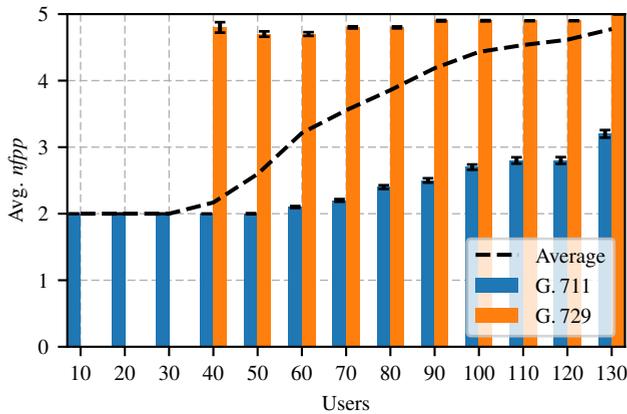


Figura 6.6 Porcentaje de llamadas satisfactorias.

A continuación, se observa con mayor detalle el comportamiento dinámico del modo avanzado del U-CAC. La Figura 6.7a muestra el porcentaje de tiempo que cada códec es usado durante las simulaciones. A partir de los 40 usuarios, G.711 (64 Kbps) es gradualmente reemplazado por G.729 (8 Kbps), liberando recursos de red y permitiendo la aceptación de más llamadas. La Figura 6.7b muestra cómo la agregación de tramas de voz a nivel de aplicación logra reducir aún más el ancho de banda (i.e., reduciendo el volumen de las cabeceras), incrementando aún más el número de llamadas simultáneas que pueden soportarse. Finalmente, se puede observar una mayor agregación de tramas bajo G.729 ya que, al ser más pequeñas que en G.711, pueden agregarse sin generar un impacto negativo en la calidad de las llamadas.



(a) Elección de códecs.

(b) Número de tramas de voz por paquete (*nfpp*).**Figura 6.7** Selección de parámetros en U-CAC (modo avanzado).

6.5 Conclusiones

En esta sección se ha propuesto un mecanismo de admisión de llamadas centralizado que unifica la funcionalidad tradicional del CAC en PSTN y el control de admisión de WiFi en un entorno corporativo. La propuesta, llamada U-CAC, no requiere de cambios en los terminales finales sino que se implementa directamente sobre la pasarela o proxy VoIP. Además, se utilizan protocolos estándares comúnmente implementados tanto en los AP comerciales como en los terminales de los usuarios. Finalmente, se propone un modo avanzado que, antes de rechazar una llamada entrante, trata de optimizar las llamadas en curso (e.g., códec, *nfft*) para liberar recursos de la red.

Los resultados obtenidos demuestran la efectividad del U-CAC. Mientras que en su modo básico logra evitar la congestión de la red mediante el rechazo de llamadas, su modo avanzado logra doblar el número de conversaciones que la red puede soportar.

7 Conclusiones y líneas de avance

Esta tesis presenta un nuevo modelo analítico para predecir el rendimiento, en términos de calidad y consumo energético, de una red WiFi bajo el tráfico de VoIP en condiciones realistas. Además, se desarrollan dos nuevas aplicaciones en las que se utiliza el modelo anterior: (a) el despliegue de UAVs equipados con puntos de acceso WiFi para dar servicio de VoIP, y (b) un mecanismo de control de admisión de llamadas válido para entornos corporativos.

El modelo analítico propuesto proporciona expresiones para el cálculo de la QoS y del consumo energético de las estaciones y del punto de acceso. Mediante simulación, se ha validado el modelo analítico propuesto y se confirma que puede ser utilizado para estimar el rendimiento y consumo de un sistema VoWiFi realista.

Este modelo ha sido utilizado en un nuevo problema de optimización para el posicionamiento de los drones que minimiza diferentes factores (e.g., coste, consumo energético) según el escenario considerado. Los resultados obtenidos muestran la influencia de la revisión del estándar utilizado en la cobertura en términos de señal. Además, los resultados demuestran la relación entre el consumo energético en la tarjeta de red, la calidad de las conversaciones y la congestión de la red.

Finalmente, el modelo se utiliza como base para proponer un nuevo mecanismo de control de admisión (CAC) para entornos corporativos. Esta propuesta no requiere el uso de protocolos propietarios ni modificaciones en los terminales VoWiFi o puntos de acceso. Además, proporciona interoperabilidad con WiFi y PSTN. Los resultados obtenidos demuestran que el CAC evita la congestión de la red al rechazar llamadas si se excede la capacidad de la red, llegando a doblar el número de conversaciones simultáneas (i.e., capacidad VoIP) que la red puede soportar frente a su rendimiento sin CAC.

Tras el trabajo desarrollado en esta tesis se contemplan las siguientes líneas de avance. En primer lugar, se propone la adaptación de un modelo analítico que contemple los mecanismos de ahorro de energía propuestos en el estándar: PSM y U-APSD. En particular, resulta de especial interés el desarrollo de un nuevo modelo para U-APSD, ya que es la más aconsejable en el despliegue de servicios en tiempo real. No obstante, esta tarea implica introducir nuevas características en el modelo que pueden disparar la complejidad de resolución del mismo (e.g., EDCA, TXOP). Estos nuevos modelos analíticos podrán ser

utilizados para extender las aplicaciones desarrolladas en esta tesis, o para el desarrollo de nuevas aplicaciones como el ajuste dinámico de parámetros del códec (e.g., tiempo de paquetización) para el ahorro de energía. Finalmente, en el contexto del despliegue de servicios VoWiFi mediante UAVs, se propone ampliar el trabajo para introducir la movilidad de los usuarios y desarrollar algoritmos que permitan reubicar los UAVs en tiempo real.

Índice de Figuras

2.1	Arquitectura en redes IEEE 802.11	8
2.2	Sub-capa MAC en 802.11	9
2.3	Funcionamiento de DCF	9
2.4	Ejemplo de ráfaga con TXOP	11
2.5	Ejemplo de acceso con PSM	13
2.6	Ejemplo de acceso con U-APSD	14
2.7	Modelo de Bianchi: Cadena de Markov	15
4.1	Validación del modelo analítico propuesto	39
5.1	Ejemplo de red VoWiFi basada en UAVs	42
5.2	Ejemplo de posicionamiento de UAVs	44
5.3	Sistema de comunicaciones de un UAV.	46
5.4	Ejemplo de uso de <i>k-means</i> para encontrar las regiones de cada dron para $D = 4$.	51
5.5	Situaciones de emergencia: función objetivo, consumo y altura media de los UAVs	53
5.6	Situaciones de emergencia: restringiendo la altura de los UAVs	54
5.7	Situaciones de emergencia: restringiendo la QoS	54
5.8	Entornos no críticos: influencia de la dispersión	55
5.9	Escenario de larga duración: función objetivo y consumo	56
6.1	Ejemplo de uso de VoIP en dominio corporativo	60
6.2	Capas de QoS en entornos corporativos	62
6.3	Componentes del U-CAC	63
6.4	Ejemplo de señalización en U-CAC	64
6.5	U-CAC: modo avanzado (aceptar tras reconfigurar)	66
6.6	Porcentaje de llamadas satisfactorias	69
6.7	Selección de parámetros en U-CAC (modo avanzado)	70

Índice de Tablas

2.1	Relación entre UP y AC	11
3.1	Clasificación de trabajos según sus simplificaciones	20
4.1	Relación entre eventos, consumos y probabilidades	32
5.1	Parámetros de entrada por defecto	52
5.2	Revisiones consideradas de IEEE 802.11	55
6.1	Estado del arte de CAC para VoWiFi	61
6.2	Listado de códecs disponibles	69

Bibliografía

- [1] H. P. Singh, S. Singh, J. Singh, and S. A. Khan, “Voip: State of art for global connectivity—a critical review,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 37, pp. 365–379, 2014.
- [2] S. Karapantazis and F.-N. Pavlidou, “Voip: A comprehensive survey on a promising technology,” *Computer Networks*, vol. 53, no. 12, pp. 2050–2090, 2009.
- [3] C. R. Johnson, Y. Kogan, Y. Levy, F. Saheban, and P. Tarapore, “Voip reliability: a service provider’s perspective,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, no. 7, pp. 48–54, 2004.
- [4] H. M. Chong and H. S. Matthews, “Comparative analysis of traditional telephone and voice-over-internet protocol (voip) systems,” in *IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 2004. Conference Record. 2004.* IEEE, 2004, pp. 106–111.
- [5] A. Malik, J. Qadir, B. Ahmad, K.-L. A. Yau, and U. Ullah, “Qos in ieee 802.11-based wireless networks: a contemporary review,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 55, pp. 24–46, 2015.
- [6] D. P. Hole and F. A. Tobagi, “Capacity of an ieee 802.11 b wireless lan supporting voip,” in *2004 IEEE International Conference on Communications (IEEE Cat. No. 04CH37577)*, vol. 1. IEEE, 2004, pp. 196–201.
- [7] W. Wang, S. C. Liew, and V. O. Li, “Solutions to performance problems in voip over a 802.11 wireless lan,” *IEEE transactions on vehicular technology*, vol. 54, no. 1, pp. 366–384, 2005.
- [8] S. Shin and H. Schulzrinne, “Measurement and analysis of the voip capacity in ieee 802.11 wlan,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 8, no. 9, pp. 1265–1279, 2009.

- [9] O. Awoniyi and F. A. Tobagi, "Effect of fading on the performance of voip in ieee 802.11 a wlans," in *2004 IEEE International Conference on Communications (IEEE Cat. No. 04CH37577)*, vol. 6. IEEE, 2004, pp. 3712–3717.
- [10] G. Bianchi, "Performance analysis of the ieee 802.11 distributed coordination function," *IEEE Journal on selected areas in communications*, vol. 18, no. 3, pp. 535–547, 2000.
- [11] G. Bianchi and I. Tinnirello, "Remarks on ieee 802.11 dcf performance analysis," *IEEE communications letters*, vol. 9, no. 8, pp. 765–767, 2005.
- [12] F. Daneshgaran, M. Laddomada, F. Mesiti, and M. Mondin, "A model of the ieee 802.11 dcf in presence of non ideal transmission channel and capture effects," in *IEEE GLOBECOM 2007-IEEE Global Telecommunications Conference*. IEEE, 2007, pp. 5112–5116.
- [13] M. A. R. Siddique and J. Kamruzzaman, "Performance analysis of m-retry beb based dcf under unsaturated traffic condition," in *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2010 IEEE*. IEEE, 2010, pp. 1–6.
- [14] F. Daneshgaran, M. Laddomada, F. Mesiti, and M. Mondin, "Modelling and analysis of the distributed coordination function of ieee 802.11 with multirate capability," in *2008 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*. IEEE, 2008, pp. 1344–1349.
- [15] D. Malone, K. Duffy, and D. Leith, "Modeling the 802.11 distributed coordination function in nonsaturated heterogeneous conditions," *IEEE/ACM Transactions on networking*, vol. 15, no. 1, pp. 159–172, 2007.
- [16] M. Laddomada, F. Mesiti, M. Mondin, and F. Daneshgaran, "On the throughput performance of multirate ieee 802.11 networks with variable-loaded stations: analysis, modeling, and a novel proportional fairness criterion," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 9, no. 5, pp. 1594–1607, 2010.
- [17] K. Duffy and A. J. Ganesh, "Modeling the impact of buffering on 802.11," *IEEE Communications Letters*, vol. 11, no. 2, 2007.
- [18] K. D. Huang and K. R. Duffy, "On a buffering hypothesis in 802.11 analytic models," *IEEE Communications Letters*, vol. 13, no. 5, 2009.
- [19] K. R. Duffy, "Mean field markov models of wireless local area networks," *Markov Processes and Related Fields*, vol. 16, no. 2, pp. 295–328, 2010.
- [20] V. Mayor, R. Estepa, A. Estepa, and G. Madinabeitia, "Deploying a reliable uav-aided communication service in disaster areas," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2019, 2019.
- [21] —, "Unified call admission control in corporate domains," *Computer Communications*, vol. 150, pp. 589–602, 2020.

- [22] "Ieee standard for information technology–telecommunications and information exchange between systems local and metropolitan area networks–specific requirements - part 11: Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications," *IEEE Std 802.11-2016 (Revision of IEEE Std 802.11-2012)*, pp. 1–3534, Dec 2016.
- [23] H. Zimmermann, "Osi reference model-the iso model of architecture for open systems interconnection," *IEEE Transactions on communications*, vol. 28, no. 4, pp. 425–432, 1980.
- [24] S. Rasheed, K. Masnoon, N. Thanthy, and R. Pendse, "Pcf vs dcf: a performance comparison," in *Thirty-Sixth Southeastern Symposium on System Theory, 2004. Proceedings of the*. IEEE, 2004, pp. 215–219.
- [25] Z. Wang, *Internet QoS: architectures and mechanisms for quality of service*. Morgan Kaufmann, 2001.
- [26] S. Jha and M. Hassan, *Engineering Internet QoS*. Artech House, 2002.
- [27] E. Setton, T. Yoo, X. Zhu, A. Goldsmith, and B. Girod, "Cross-layer design of ad hoc networks for real-time video streaming," *IEEE Wireless Communications*, vol. 12, no. 4, pp. 59–65, 2005.
- [28] "Ieee standard for information technology–local and metropolitan area networks–specific requirements–part 11: Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications - amendment 8: Medium access control (mac) quality of service enhancements," *IEEE Std 802.11e-2005 (Amendment to IEEE Std 802.11, 1999 Edition (Reaff 2003))*, pp. 1–212, Nov 2005.
- [29] B. Vijay and B. Malarkodi, "Improved qos in wlan using ieee 802.11 e," *Procedia Computer Science*, vol. 89, pp. 17–26, 2016.
- [30] "Ieee standard for information technology– local and metropolitan area networks–specific requirements– part 11: Wireless medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications amendment 3: Specification for operation in additional regulatory domains," *IEEE Std 802.11d-2001*, pp. 1–41, July 2001.
- [31] C.-L. Huang and W. Liao, "Throughput and delay performance of ieee 802.11 e enhanced distributed channel access (edca) under saturation condition," *IEEE Transactions on wireless communications*, vol. 6, no. 1, pp. 136–145, 2007.
- [32] Z.-n. Kong, D. H. Tsang, B. Bensaou, and D. Gao, "Performance analysis of ieee 802.11 e contention-based channel access," *IEEE Journal on selected areas in communications*, vol. 22, no. 10, pp. 2095–2106, 2004.
- [33] J. Hu, G. Min, and M. E. Woodward, "Performance analysis of the txop burst transmission scheme in single-hop ad hoc networks with unbalanced stations," *Computer Communications*, vol. 34, no. 13, pp. 1593–1603, 2011.

- [34] G. Min, J. Hu, W. Jia, and M. E. Woodward, "Performance analysis of the txop scheme in ieee 802.11 e w lans with bursty error channels," in *2009 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*. IEEE, 2009, pp. 1–6.
- [35] J. Hu, G. Min, and M. E. Woodward, "Modeling of ieee 802.11 e contention free bursting scheme with heterogeneous stations," in *2007 15th International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems*. IEEE, 2007, pp. 88–94.
- [36] ITU-T, "Itu-t recommendation g.107 : The e-model, a computational model for use in transmission planning," International Telecommunication Union, International Telecommunication Union, Tech. Rep., June 2015.
- [37] I.-T. C. D. 110, "Subjective results on impairment effects of packet loss," *International Telecommunication Union, Geneva*, p. 22, September 1999.
- [38] E. Charfi, L. Chaari, and L. Kamoun, "New adaptive frame aggregation call admission control (afa-cac) for high throughput w lans," *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 26, no. 3, pp. 469–481, 2015.
- [39] H.-T. Wu, M.-H. Yang, and K.-W. Ke, "The design of qos provisioning mechanisms for wireless networks," in *Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM Workshops), 2010 8th IEEE International Conference on*. IEEE, 2010, pp. 756–759.
- [40] T. Daengsi, C. WutiwWATCHAI, A. Preechayasomboon, and S. Sukparungsee, "A study of voip quality evaluation: User perception of voice quality from g. 729, g. 711 and g. 722," in *2012 IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*. IEEE, 2012, pp. 342–345.
- [41] Y. Yang, Y. Qiu, and T. Zhang, "Performance analysis of vowifi on ran," in *2017 International Conference on Computer, Information and Telecommunication Systems (CITS)*. IEEE, 2017, pp. 6–9.
- [42] F. Anjum, M. Elaoud, D. Famolari, A. Ghosh, R. Vaidyanathan, A. Dutta, P. Agrawal, T. Kodama, and Y. Katsube, "Voice performance in wlan networks-an experimental study," in *GLOBECOM'03. IEEE Global Telecommunications Conference (IEEE Cat. No. 03CH37489)*, vol. 6. IEEE, 2003, pp. 3504–3508.
- [43] S. Garg and M. Kappes, "An experimental study of throughput for udp and voip traffic in ieee 802.11 b networks," in *2003 IEEE Wireless Communications and Networking, 2003. WCNC 2003.*, vol. 3. IEEE, 2003, pp. 1748–1753.
- [44] T. Patel, V. Ogale, S. Baek, N. Cui, and R. Park, "Capacity estimation of voip channels on wireless networks," *Dept of Electrical and Computer Engineering, The University of Texas at Austin*, pp. 1–37, 2003.
- [45] S. Garg and M. Kappes, "Can i add a voip call?" in *IEEE International Conference on Communications, 2003. ICC'03.*, vol. 2. IEEE, 2003, pp. 779–783.

- [46] L. X. Cai, X. Shen, J. W. Mark, L. Cai, and Y. Xiao, "Voice capacity analysis of wlan with unbalanced traffic," *IEEE transactions on vehicular technology*, vol. 55, no. 3, pp. 752–761, 2006.
- [47] L. X. Cai, X. Ling, X. S. Shen, J. W. Mark, and L. Cai, "Supporting voice and video applications over ieee 802.11 n w lans," *Wireless Networks*, vol. 15, no. 4, pp. 443–454, 2009.
- [48] K. O. Stoeckigt and H. L. Vu, "Voip capacity—analysis, improvements, and limits in ieee 802.11 wireless lan," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 9, pp. 4553–4563, 2010.
- [49] M. A. R. Siddique, J. Kamruzzaman, and M. J. Hossain, "An analytical approach for voice capacity estimation over wifi network using itu-t e-model," *IEEE transactions on multimedia*, vol. 16, no. 2, pp. 360–372, 2013.
- [50] W. Kim, T. Song, T. Kim, H. Park, and S. Pack, "Voip capacity analysis in full duplex w lans," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 12, pp. 11 419–11 424, 2017.
- [51] Q. Zhang and Y.-Q. Zhang, "Cross-layer design for qos support in multihop wireless networks," *Proceedings of the IEEE*, vol. 96, no. 1, pp. 64–76, 2007.
- [52] Z. Qiao, L. Sun, N. Heilemann, and E. Ifeachor, "A new method for voip quality of service control use combined adaptive sender rate and priority marking," in *2004 IEEE International Conference on Communications (IEEE Cat. No. 04CH37577)*, vol. 3. IEEE, 2004, pp. 1473–1477.
- [53] S. Shin and H. Schulzrinne, "Balancing uplink and downlink delay of voip traffic in w lans using adaptive priority control (apc)," in *Proceedings of the 3rd international conference on Quality of service in heterogeneous wired/wireless networks*, 2006, pp. 41–es.
- [54] D. Pong and T. Moors, "Call admission control for ieee 802.11 contention access mechanism," in *Global Telecommunications Conference, 2003. GLOBECOM'03. IEEE*, vol. 1. IEEE, 2003, pp. 174–178.
- [55] C. Cano, B. Bellalta, and M. Oliver, "Adaptive admission control mechanism for ieee 802.11 e w lans," in *2007 IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*. IEEE, 2007, pp. 1–5.
- [56] S. Yun, H. Kim, and I. Kang, "Squeezing 100+ voip calls out of 802.11 b w lans," in *2006 International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM'06)*. IEEE, 2006, pp. 7–pp.
- [57] K.-W. Chin, "On maximizing voip capacity and energy conservation in multi-rate w lans," *IEEE communications letters*, vol. 14, no. 7, pp. 611–613, 2010.

- [58] A. J. Estepa, R. Estepa, V. Mayor, G. Madinabeitia, and M. Davis, "Adaptative control of packetization to improve the energy efficiency of voip applications in ieee 802.11 networks." *Network Protocols & Algorithms*, vol. 9, no. 3-4, pp. 115–135, 2017.
- [59] P. McGovern, S. Murphy, and L. Murphy, "Wlc29-1: Addressing the link adaptation problem for vowlan using codec adaptation," in *IEEE Globecom 2006*. IEEE, 2006, pp. 1–6.
- [60] A. Trad, Q. Ni, and H. Afifi, "Adaptive voip transmission over heterogeneous wired/wireless networks," in *International Workshop on Multimedia Interactive Protocols and Systems*. Springer, 2004, pp. 25–36.
- [61] B. Tebbani and K. Haddadou, "Codec-based adaptive qos control for vowlan with differentiated services," in *2008 1st IFIP Wireless Days*. IEEE, 2008, pp. 1–5.
- [62] K. J. Koo, D. Y. Ko, B. S. Lee, S. H. Jeong *et al.*, "A codec-based qos control mechanism for voice over ieee 802.11 wlan," in *The International Conference on Information Networking 2011 (ICOIN2011)*. IEEE, 2011, pp. 504–508.
- [63] M. F. Tüysüz and H. A. Mantar, "An adaptive codec and frame size modification based qos algorithm over multi-rate wlangs," in *International Conference on Wireless and Mobile Networks*. Springer, 2010, pp. 137–147.
- [64] R. Reynolds and A. Rix, "Quality voip—an engineering challenge," *BT Technology Journal*, vol. 19, no. 2, pp. 23–32, 2001.
- [65] T. Uhl, "Quality of service in voip communication," *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 58, no. 3, pp. 178–182, 2004.
- [66] A. Raja, R. M. A. Azad, C. Flanagan, and C. Ryan, "Real-time, non-intrusive evaluation of voip," in *European Conference on Genetic Programming*. Springer, 2007, pp. 217–228.
- [67] I. Rec, "P. 800: Methods for subjective determination of transmission quality," *International Telecommunication Union, Geneva*, p. 22, 1996.
- [68] A. Takahashi, H. Yoshino, and N. Kitawaki, "Perceptual qos assessment technologies for voip," *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, no. 7, pp. 28–34, 2004.
- [69] A. W. Rix and M. P. Hollier, "The perceptual analysis measurement system for robust end-to-end speech quality assessment," in *2000 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Proceedings (Cat. No. 00CH37100)*, vol. 3. IEEE, 2000, pp. 1515–1518.
- [70] ITU-T, "Objective quality measurement of telephone-band (300 - 3400 hz) speech codecs," International Telecommunication Union, Geneva, Recommendation P.861, 1996.

- [71] —, “An objective method for end-to-end speech quality assessment of narrow-band telephone networks and speech codecs,” International Telecommunication Union, Recommendation P.862, 2001.
- [72] H. Assem, D. Malone, J. Dunne, and P. O’Sullivan, “Monitoring voip call quality using improved simplified e-model,” in *Computing, networking and communications (ICNC), 2013 international conference on*. IEEE, 2013, pp. 927–931.
- [73] M. Manousos, S. Apostolacos, I. Grammatikakis, D. Mexis, D. Kagklis, and E. Sykas, “Voice-quality monitoring and control for voip,” *IEEE Internet Computing*, vol. 9, no. 4, pp. 35–42, 2005.
- [74] A. Chhabra and D. Singh, “Assessment of voip e-model over 802.11 wireless mesh network,” in *2015 International Conference on Advances in Computer Engineering and Applications*. IEEE, 2015, pp. 856–860.
- [75] M. Ergen and P. Varaiya, “Decomposition of energy consumption in ieee 802.11,” in *2007 IEEE International Conference on Communications*. IEEE, 2007, pp. 403–408.
- [76] G. Pei and T. R. Henderson, “Validation of ns-3 802.11b phy model,” Boeing Research and Technology, Tech. Rep., May 2009.
- [77] —, “Validation of ofdm error rate model in ns-3,” Boeing Research and Technology, Boeing Research and Technology, Tech. Rep., 2010.
- [78] Q. Zhao, D. H. Tsang, and T. Sakurai, “A simple and approximate model for nonsaturated ieee 802.11 dcf,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 8, no. 11, pp. 1539–1553, 2009.
- [79] —, “Modeling nonsaturated ieee 802.11 dcf networks utilizing an arbitrary buffer size,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 10, no. 9, pp. 1248–1263, 2011.
- [80] R. Clarke, “Understanding the drone epidemic,” *Computer Law & Security Review*, vol. 30, no. 3, pp. 230–246, 2014.
- [81] S. Yahyanejad and B. Rinner, “A fast and mobile system for registration of low-altitude visual and thermal aerial images using multiple small-scale uavs,” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 104, pp. 189–202, 2015.
- [82] S. Adams, C. Friedland, and M. Levitan, “Unmanned aerial vehicle data acquisition for damage assessment in hurricane events,” in *Proceedings of the 8th International Workshop on Remote Sensing for Disaster Management, Tokyo, Japan*, vol. 30, 2010.
- [83] Y. Zeng, R. Zhang, and T. J. Lim, “Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 5, pp. 36–42, May 2016.

- [84] I. Jawhar, N. Mohamed, J. Al-Jaroodi, D. P. Agrawal, and S. Zhang, "Communication and networking of uav-based systems: Classification and associated architectures," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 84, pp. 93–108, 2017.
- [85] A. Hayajneh, S. Zaidi, D. C. McLernon, M. Di Renzo, and M. Ghogho, "Performance analysis of uav enabled disaster recovery networks: A stochastic geometric framework based on cluster processes," *IEEE Access*, 2018.
- [86] M. Erdelj, M. Król, and E. Natalizio, "Wireless sensor networks and multi-uav systems for natural disaster management," *Computer Networks*, vol. 124, pp. 72–86, 2017.
- [87] M. S. Alvissalim, B. Zaman, Z. A. Hafizh, M. A. Ma'sum, G. Jati, W. Jatmiko, and P. Mursanto, "Swarm quadrotor robots for telecommunication network coverage area expansion in disaster area," in *SICE Annual Conference (SICE), 2012 Proceedings of*. IEEE, 2012, pp. 2256–2261.
- [88] M. Deruyck, J. Wyckmans, L. Martens, and W. Joseph, "Emergency ad-hoc networks by using drone mounted base stations for a disaster scenario," in *Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), 2016 IEEE 12th International Conference on*. IEEE, 2016, pp. 1–7.
- [89] G. Tuna, B. Nefzi, and G. Conte, "Unmanned aerial vehicle-aided communications system for disaster recovery," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 41, pp. 27–36, 2014.
- [90] A. G. Fragkiadakis, I. G. Askoxyllakis, E. Z. Tragos, and C. V. Verikoukis, "Ubiquitous robust communications for emergency response using multi-operator heterogeneous networks," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2011, no. 1, p. 13, 2011.
- [91] T. Fujiwara and T. Watanabe, "An ad hoc networking scheme in hybrid networks for emergency communications," *Ad Hoc Networks*, vol. 3, no. 5, pp. 607 – 620, 2005, data Communication and Topology Control in Ad Hoc Networks. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S157087050400068X>
- [92] S. Saha, S. Nandi, P. S. Paul, V. K. Shah, A. Roy, and S. K. Das, "Designing delay constrained hybrid ad hoc network infrastructure for post-disaster communication," *Ad Hoc Networks*, vol. 25, pp. 406–429, 2015.
- [93] G. Tuna, T. V. Mumcu, and K. Gulez, "Design strategies of unmanned aerial vehicle-aided communication for disaster recovery," in *High Capacity Optical Networks and Enabling Technologies (HONET), 2012 9th International Conference on*. IEEE, 2012, pp. 115–119.
- [94] Y. Bai, W. Duh, Z. Ma, C. Shen, Y. Zhou, and B. Chen, "Emergency communication system by heterogeneous wireless networking," 2010, pp. 488–492.

- [95] D. Zorbas, L. D. P. Pugliese, T. Razafindralambo, and F. Guerriero, "Optimal drone placement and cost-efficient target coverage," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 75, pp. 16–31, 2016.
- [96] Y. Li and L. Cai, "Uav-assisted dynamic coverage in a heterogeneous cellular system," *IEEE Network*, vol. 31, no. 4, pp. 56–61, 2017.
- [97] X. Zhang and L. Duan, "Fast deployment of uav networks for optimal wireless coverage," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2018.
- [98] S. Morgenthaler, T. Braun, Z. Zhao, T. Staub, and M. Anwander, "Uavnet: A mobile wireless mesh network using unmanned aerial vehicles," in *Globecom Workshops (GC Wkshps), 2012 IEEE*. IEEE, 2012, pp. 1603–1608.
- [99] S. Aust, R. V. Prasad, and I. G. Niemegeers, "Outdoor long-range w lans: a lesson for iee 802.11 ah," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 3, pp. 1761–1775, 2015.
- [100] E. Yanmaz, R. Kuschig, and C. Bettstetter, "Achieving air-ground communications in 802.11 networks with three-dimensional aerial mobility," in *INFOCOM, 2013 Proceedings IEEE*. IEEE, 2013, pp. 120–124.
- [101] C.-M. Cheng, P.-H. Hsiao, H. Kung, and D. Vlah, "Performance measurement of 802.11 a wireless links from uav to ground nodes with various antenna orientations," in *Computer Communications and Networks, 2006. ICCCN 2006. Proceedings. 15th International Conference on*. IEEE, 2006, pp. 303–308.
- [102] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, and M. Debbah, "Drone small cells in the clouds: Design, deployment and performance analysis," in *Global Communications Conference (GLOBECOM), 2015 IEEE*. IEEE, 2015, pp. 1–6.
- [103] P. Yang, X. Cao, X. Xi, Z. Xiao, and D. Wu, "Three-dimensional drone-cell deployment for congestion mitigation in cellular networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 10, pp. 9867–9881, 2018.
- [104] A. Al-Hourani, S. Kandeepan, and S. Lardner, "Optimal lap altitude for maximum coverage," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 3, no. 6, pp. 569–572, 2014.
- [105] E. W. Wong, A. Zalesky, and M. Zukerman, "On generalizations of the engset model," *IEEE Communications Letters*, vol. 11, no. 4, 2007.
- [106] A. Abdilla, A. Richards, and S. Burrow, "Power and endurance modelling of battery-powered rotorcraft," in *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, 2015, pp. 675–680.
- [107] G. J. Leishman, *Principles of helicopter aerodynamics with CD extra*. Cambridge university press, 2006.

- [108] K. Sem and S. Malhotra, "Multi-criteria network design using genetic algorithm," *IET Conference Publications*, vol. 2008, no. CP535, pp. 56–60, 2008. [Online]. Available: <http://link.aip.org/link/abstract/IEECPS/v2008/iCP535/p56/s1>
- [109] R. V. Kulkarni and G. K. Venayagamoorthy, "Bio-inspired algorithms for autonomous deployment and localization of sensor nodes," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, vol. 40, no. 6, pp. 663–675, 2010.
- [110] S. Sabino and A. Grilo, "Topology control of unmanned aerial vehicle (uav) mesh networks: A multi-objective evolutionary algorithm approach," in *Proceedings of the 4th ACM Workshop on Micro Aerial Vehicle Networks, Systems, and Applications*. ACM, 2018, pp. 45–50.
- [111] B. Dengiz, F. Altıparmak, and A. E. Smith, "Local search genetic algorithm for optimal design of reliable networks," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 1, no. 3, pp. 179–188, 1997.
- [112] H. G. Perros and K. M. Elsayed, "Call admission control schemes: a review," *IEEE Communications Magazine*, vol. 34, no. 11, pp. 82–91, 1996.
- [113] B. Chatras, "Business communications standardization in etsi," *IEEE Wireless Communications*, vol. 16, no. 3, pp. 8–14, 2009.
- [114] X. Fan and M. Jonsson, "Guaranteed real-time services over standard switched ethernet," in *The IEEE Conference on Local Computer Networks 30th Anniversary (LCN'05) I*. IEEE, 2005, pp. 3–pp.
- [115] Y. Xiao, H. Li, and S. Choi, "Protection and guarantee for voice and video traffic in ieee 802.11 e wireless lans," in *IEEE INFOCOM 2004*, vol. 3. IEEE, 2004, pp. 2152–2162.
- [116] S. Mangold, S. Choi, P. May, O. Klein, G. Hiertz, and L. Stibor, "Ieee 802.11 e wireless lan for quality of service," in *Proc. European Wireless*, vol. 2, 2002, pp. 32–39.
- [117] L. Cai, Y. Xiao, X. Shen, L. Cai, and J. W. Mark, "Voip over wlan: Voice capacity, admission control, qos, and mac," *International Journal of Communication Systems*, vol. 19, no. 4, pp. 491–508, 2006.
- [118] K. Mase and H. Kobayashi, "An efficient end-to-end measurement based admission control for voip networks," in *2004 IEEE International Conference on Communications (IEEE Cat. No. 04CH37577)*, vol. 4. IEEE, 2004, pp. 1877–1881.
- [119] P. McGovern, P. Perry, S. Murphy, and L. Murphy, "Endpoint-based call admission control and resource management for vowlan," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 10, no. 5, pp. 684–699, 2010.

- [120] P. Dini, N. Baldo, J. Nin-Guerrero, J. Mangues-Bafalluy, S. Addepalli, and L. L. Dai, "Distributed call admission control for voip over 802.11 wlans based on channel load estimation," in *2010 IEEE International Conference on Communications*. IEEE, 2010, pp. 1–6.
- [121] M. A. Ramirez-Reyna, F. A. Cruz-Pérez, S. L. Castellanos-Lopez, G. Hernandez-Valdez, and M. E. Rivero-Angeles, "Connection admission control strategy for wireless voip networks using different codecs and/or codec mode-sets," in *2017 20th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*. IEEE, 2017, pp. 258–264.
- [122] —, "Differentiated connection admission control strategy for wireless voip networks with adaptive modulation coding," in *2018 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*. IEEE, 2018, pp. 31–37.
- [123] X. Chen, H. Zhai, X. Tian, and Y. Fang, "Supporting qos in ieee 802.11 e wireless lans," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 5, no. 8, pp. 2217–2227, 2006.
- [124] N. C. Taher, Y. Ghamri-Doudane, B. El Hassan, and N. Agoulmine, "An efficient model-based admission control algorithm to support voice and video services in 802.11 e wlans," in *Information Infrastructure Symposium, 2009. GIIIS'09. Global*. IEEE, 2009, pp. 1–8.
- [125] J. Zhu and A. O. Fapojuwo, "A new call admission control method for providing desired throughput and delay performance in ieee802.11e wireless lans," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 6, no. 2, pp. 701–709, 2007.
- [126] Q.-l. Wu, Z.-j. Huang, and S.-y. Wang, "Heterogeneous voice flows-oriented call admission control in ieee 802.11 e wlans," *International Journal of Electronics*, vol. 101, no. 4, pp. 531–552, 2014.
- [127] T. Inaba, S. Sakamoto, T. Oda, M. Ikeda, and L. Barolli, "A qos-aware admission control system for wlan using fuzzy logic," in *2016 30th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA)*. IEEE, 2016, pp. 499–505.
- [128] S. Garg and M. Kappes, "Admission control for voip traffic in ieee 802.11 networks," in *GLOBECOM'03. IEEE Global Telecommunications Conference (IEEE Cat. No. 03CH37489)*, vol. 6. IEEE, 2003, pp. 3514–3518.
- [129] Y. Qian, R.-Y. Hu, and H.-H. Chen, "A call admission control framework for voice over wlans," *IEEE Wireless Communications*, vol. 13, no. 1, pp. 44–50, 2006.
- [130] M. Handley, V. Jacobson, and C. Perkins, "Sdp: session description protocol," Tech. Rep., 2006.
- [131] J. D. Case, M. Fedor, M. L. Schoffstall, and J. Davin, "Simple network management protocol (snmp)," Tech. Rep., 1990.

- [132] J. Van Meggelen, L. Madsen, and J. Smith, *Asterisk: The future of telephony*. "O'Reilly Media, Inc.", 2007.
- [133] A. Robar, *FreePBX 2.5 Powerful Telephony Solutions*. Packt Publishing Ltd, 2009.
- [134] A. Amirante, S. P. Romano, K. H. Kim, and H. Schulzrinne, "Online non-intrusive diagnosis of one-way rtp faults in voip networks using cooperation," 12 2010, pp. 146–154.