

Tendencias, Oportunidades, y Retos con el Acceso Inalámbrico en Bandas de Frecuencia Sin Licencia Interiores: un escenario clave en 5G

David González G, PhD¹, Héctor Poveda, PhD², Edgar Ramos, MSc¹

¹ Aalto University, Finlandia, {david.gonzalezgonzalez, edgar.ramos}@aalto.fi

² Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá, hector.poveda@utp.ac.pa

Abstract— En la actualidad, industria y comunidad científica desarrollan un gran número de actividades en foros de diversa índole para perfilar el sistema de comunicaciones móviles que conoceremos como 5G. Entre los muchos retos, aumentar significativamente la capacidad para hacer frente al crecimiento exponencial de la demanda es esencial; y para ello, se precisa de disponer de más ancho de banda y hacer uso eficiente del mismo. De este modo, uno de los conceptos que se proponen en 5G es la integración de espectro sin licencia; es decir, dotar las redes móviles con la capacidad de utilizar/aprovechar las bandas de frecuencia de ‘acceso libre’. Esta idea, *a priori* simple, supone importantes retos desde varios puntos de vista, y por lo tanto, presentamos en este trabajo una visión amplia, completa, y actualizada de las actividades y avances que se están realizando para cristalizar esta visión en el contexto de 5G. Además, se presenta un esquema de planificación para tecnología celular *Long Term Evolution* (LTE) en interiores teniendo en cuenta la presencia de redes inalámbricas de área local, como WiFi. Los resultados ponen de manifiesto que este tipo de metodología es vital para maximizar el rendimiento de ambos sistemas.

Index Terms—Redes celulares, bandas de frecuencia sin licencia, acceso radio en interiores, LTE-U, WiFi, 5G.

I. INTRODUCCIÓN

Desde que *Radiolinja*, en 1991, realizará la primera llamada con el sistema GSM (*Global System for Mobile Communications*) en Finlandia; la industria de las comunicaciones móviles inalámbricas ha experimentado un crecimiento sorprendente. De acuerdo a [1], 3.6 billones de personas tenían una suscripción móvil para finales de 2014, es decir, la mitad de la población mundial, y se espera que la penetración a nivel global para 2020 ronde el 60%. En estos 25 años, las llamadas generaciones de la telefonía celular, cada una en mayor o menor medida caracterizada por su correspondiente esquema de acceso radio [2], han ido transformando nuestras sociedades. Hoy es un hecho que la gran mayoría de las personas prefiere acceder a Internet a través de dispositivos móviles [3], es decir, computadores portátiles, tabletas, y los cada vez más potentes *smartphones*. Esta situación ha generado una enorme presión en los operadores de redes móviles, los cuales no solo se ven ante la necesidad de incrementar significativamente la capacidad, sino que además deben hacer frente a nuevos y desafiantes retos técnicos, para los cuales las tecnologías actuales no han sido diseñadas [4]. De esta forma, el panorama que actualmente se vislumbra con la quinta generación (5G) es simplemente *rompedor* [5, 6].

En muchos sentidos 5G supondrá la introducción de nuevos paradigmas y será la tecnología que hará posible *La Internet de las Cosas* (IoT) [7, 8], de las *nano-cosas* [9], y *La Internet Táctil* [10]. Además permitirá aprovechar y desarrollar nuevas herramientas y esquemas como el *Big Data* [11], *Cloud-computing* [12], virtualización [13], y las redes sociales [14]. En resumen, 5G tendrá un impacto sin precedente en la vida de las personas, y también continuará transformando la forma en que nos comunicamos y accedemos a la información.

Las razones arriba descritas ponen en evidencia la importancia que tendrá 5G en nuestro diario vivir. Por este motivo, este documento hace una contribución ofreciendo una visión amplia, completa, y actualizada, del acceso inalámbrico en bandas de frecuencia sin licencia (en adelante ‘acceso sin licencia’) y del rol que jugará este concepto en 5G. Esencialmente, en el acceso sin licencia se trata de utilizar bandas de frecuencia que son de libre utilización (no se requiere permiso de ningún organismo regulador), aunque sujetas a ciertas regulaciones, para cursar el tráfico generado por los usuarios (ó las cosas) [15]. A través de este documento esperamos poner en perspectiva los siguientes aspectos del acceso sin licencia: ¿qué es y cómo se regula? ¿porqué es necesario? ¿qué ventajas y desventajas supone? y finalmente, pero no menos importante, ¿qué retos plantea desde el punto de vista de investigación y desarrollo?.

Los aspectos anteriores serán discutidos en el contexto del acceso en interiores, un escenario de gran importancia en 5G [4], en donde la omnipresencia de las redes de área local [16], en particular las tecnologías IEEE 802.11 [17] usualmente conocidas como WiFi¹ [18], han originado un intenso debate sobre la coexistencia con las tecnologías celulares [19]. Dado que en bandas de frecuencia sin licencia existen restricciones en términos de potencia máxima transmitida, los entornos interiores (casas, centros comerciales, oficinas) son un candidato natural para la utilización de espectro no licenciado, hecho claramente verificado con las redes WiFi. Como dato notable, el hecho de haber sido diseñadas para operar en la banda ISM (Industrial, Scientific and Medical), con acceso sin licencia y disponible mundialmente, fue en su momento uno de los grandes aciertos de los estándares IEEE 802.11. Además, otros temas de importancia en torno al

¹El término WiFi proviene de *Wireless Fidelity*. Este término se utilizará para referirse a puntos de acceso basados en tecnología IEEE 802.11.

espectro sin licencia también han sido planteados; por ejemplo, es una pregunta abierta si el uso de ondas milimétricas en sistemas 5G debe ó no hacerse en espectro sin licencia [20]. De este modo, y en atención al contexto descrito previamente, se presenta, como contribución adicional, un marco de trabajo para planificación y optimización de despliegues celulares en entornos interiores con acceso WiFi pre-existente.

El resto del papel está organizado de la siguiente forma: la siguiente sección discute la actualidad de 5G y algunos paradigmas de importancia. La Sección III presenta el acceso sin licencia desde la perspectiva de LTE, WiFi, y 5G. Algunos aspectos relevantes en la planificación de acceso radio en interiores son discutidos en la Sección IV. Las Secciones V y VI presentan un marco de trabajo para planificación, y sus correspondientes resultados, respectivamente. Finalmente, las conclusiones concluyen el artículo en la Sección VII.

II. 5G A DÍA DE HOY: UN VISTAZO

Sin lugar a dudas, hoy en día, 5G es el término más escuchado, y con diferencia, en todos los foros científicos e industriales relacionados con comunicaciones móviles. Y es que a pesar de la intención de gigantes de la industria, como DOCOMO (Japón) y Ericsson, que pretenden lanzar 5G para los juegos olímpicos previstos en Tokio para julio de 2020 [21], no existe un consenso general en muchos aspectos de 5G. Mientras algunos *actores* importantes de la industria hablan de *revolución*, otros van más en la línea de *evolución* [6]. No obstante, pese a que las discusiones a nivel de foros y organismos de estandarización son complejas, la realización de 5G continúa y más temprano que tarde tendremos especificaciones y estándares. Sin embargo, ya en un contexto más teórico, parece sí existir un consenso general en cuanto a los objetivos que se pretende conseguir con 5G [22] y algunos conceptos que deben ser incorporados [4]. Los siguientes paradigmas son piedras angulares en 5G:

1) **Más ancho de banda.** La necesidad de más ancho de banda es fundamental dado que la capacidad de los enlaces crece (en teoría) linealmente con el ancho de banda. Esto ha propiciado el interés en 1) desarrollar las comunicaciones con las llamadas ondas milimétricas (mmW) [20, 23], y 2) aprovechar mejor el espectro sin licencia (2.4 GHz y 5 GHz). Sin embargo, diseñar sistemas de comunicaciones móviles capaces de operar con grandes anchos de banda, accediendo posiblemente a diferentes regiones del espectro, es un reto considerable desde muchos puntos de vista. Esto se ha identificado en diversos foros y discusiones sobre 5G [4, 22], en donde se empieza a vislumbrar que los sistemas futuros deben ser ágiles y flexibles, para adaptarse mejor a cada contexto y marco regulatorio. Para 5G, en lo concerniente a comunicaciones móviles, se han definido de acuerdo a [22] 3 tipos de bandas de frecuencia (uso exclusivo, compartida, y de acceso libre) y 2 categorías de servicios (servicios primarios y secundarios). Además se propone la utilización de un *Spectrum Toolbox* con el fin de facilitar la operación de sistemas 5G bajo diferentes esquemas de autorización. Esto es necesario porque diferen-

tes servicios tienen diferentes requerimientos en términos de tipo de banda, ancho de banda, esquema de acceso, etc. Otras modalidades de asignación de espectro más dinámicas (*on-demand*) también se podrían considerar [6]. En esta línea, otro aspecto de mucha importancia es la *armonización*. Recientemente, en la *World Radiocommunication Conference 2015 (WRC-15)* de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU), se identificaron, para servicios de comunicaciones móviles a nivel global, las sub-bandas 1427-1518 MHz y 3.4-3.6 GHz, en las bandas L y C, respectivamente. Sin embargo, identificar bandas más allá de los 6 GHz fue dejado como un *item* de estudio para el próximo WRC en 2019. Esta situación incrementa la necesidad de utilizar muy eficientemente, y a corto plazo, las bandas sin licencia en 2.4 GHz y 5 GHz. Todo lo anterior en su conjunto viene a ser la razón principal por la cual se esté considerando a nivel de estandarización, hacer posible que *Long Term Evolution (LTE)* [24] opere en bandas de frecuencia sin licencia, aprovechando funcionalidades existentes como *carrier aggregation* [25]. Este concepto se conoce como LTE-Unlicensed (LTE-U) [19, 26].

2) **Densificación y arquitectura.** Aumentar el número de *puntos de acceso*, estaciones base, o nodos es fundamental para incrementar la eficiencia espectral por unidad de área y ancho de banda. Además de incrementar la capacidad, un despliegue adecuado puede ayudar a mejorar la cobertura de las redes. Este aspecto es especialmente importante porque como se acaba de mencionar, gran parte del ancho de banda requerido para los futuros sistemas se encuentra en frecuencias más altas (mmW), las cuales presentan una mayor atenuación por propagación/penetración. Por lo tanto, garantizar una cobertura fiable es crítico para soportar IoT. Además, la tendencia moderna de construir las estructuras con materiales termo-aislantes para mejorar la eficiencia energética de los edificios, tiene como efecto secundario ser radio-aislante, lo que dificulta incluso más, la penetración a altas frecuencias. De esta forma, la continua densificación modifica la arquitectura de la red de acceso radio y tenemos las llamadas redes heterogéneas (HetNets) [27] que plantean interesantes preguntas, retos, y oportunidades. Por ejemplo, ¿se debería desacoplar los planos de usuario y control?, ¿se debería desacoplar el enlace descendente (*downlink*) y el ascendente (*uplink*)?, ¿cómo se pueden conectar todos estos nodos entre ellos y a la red de forma fiable?. Además, desde un punto de vista más teórico, aspectos de modelado, planificación, análisis, y optimización también requieren nuevos métodos y técnicas [28–30].

3) **Más eficiencia espectral/energética.** Mejorar la eficiencia, capacidad, y fiabilidad de los enlaces punto-punto reduciendo simultáneamente los requerimientos de consumo energético, es un objetivo fundamental en 5G. Conceptos como *massive Multiple Input Multiple Output (MIMO)* [5] y *multiuser-MIMO (MU-MIMO)* [31] han sido identificados como clave. Además se esperan avances en la teoría e implementación de codificación de canal [32], cancelación

de interferencia [33], conectividad múltiple (*multi-RAT*) [4, 34], *beamforming* [35], y eficiencia energética [36].

III. ACCESO INALÁMBRICO EN ESPECTRO SIN LICENCIA

A. Tecnologías: WiFi y LTE-U

Uno de los grandes aciertos de las redes de área local (*Local Area Networks: WLAN*), y en particular de los estándares IEEE 802.11 [17], fue haber sido diseñadas para operar en bandas de frecuencia de acceso sin licencia a nivel mundial: 2.400 GHz-2.500 GHz y 5.725 GHz-5.875 GHz; es decir las bandas ISM y *Unlicensed National Information Infrastructure* (U-NII), respectivamente². Esto, unido a la filosofía de los estándares de IEEE de solo estandarizar las capas física y de acceso al medio [38], permitió a los fabricantes producir equipos IEEE 802.11 para una economía de escala global, haciéndolos de este modo muy competitivos en términos económicos. A día de hoy, se podría afirmar que WiFi es omnipresente y que ha sido el medio de acceso *de facto* en interiores. Sin embargo, WiFi presenta ciertos inconvenientes:

- 1) Debido a su *Medium Access Control* (MAC) distribuido, la capacidad de los puntos de acceso WiFi se degrada substancialmente a partir de un determinado número de usuarios, lo cual es un inconveniente en entornos como centros comerciales, aeropuertos, etc. En este sentido WiFi ha sido víctima de su propio éxito; ya que la instalación no coordinada por diferentes operadores exaspera las limitaciones de la tecnología en cuanto a manejo de interferencia.
- 2) Los mecanismos de autenticación de WiFi aún permanecen fragmentados. Los portales cautivos aún son la solución más empleada lo cual genera un cierta molestia en los usuarios al no ser un proceso completamente transparente al usuario como el caso de las redes celulares.
- 3) WiFi es percibido como un acceso gratuito, lo cual limita a los operadores para crear nuevos modelos de negocio.
- 4) La eficiencia espectral de WiFi comparado con otras tecnologías inalámbricas como LTE es inferior debido a su reducido soporte para estimación de canal, y por tanto, la selección y adaptación de esquemas de modulación y codificación es menos precisa [39]. Además, los fabricantes solo implementan partes del estándar haciendo, reduciendo la compatibilidad de opciones avanzadas.

Actualmente, WiFi también es utilizado como solución para ‘descargar’ tráfico de las redes celulares, el llamado *offloading* [40, 41], principalmente porque la cobertura interior (*indoor*) desde las macro-celdas puede resultar problemática, y cuando existe es usualmente costosa en términos de recursos radio. Dado que una gran parte de la demanda de las redes celulares se genera en interiores [42], y se espera que crezca aún más, así como la diversidad de servicios/usuarios/dispositivos conectados a la red, es de suponer

²El marco regulatorio (límites de potencia, etc.) para el uso de estas frecuencias en América esta definido por la *Federal Communication Commission* (FCC), ver [37]. A nivel europeo, el *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) se encarga de estas cuestiones.

que una tecnología como LTE-U, similar a WiFi³ en cuanto a su naturaleza de área local, pero complementaria en otros sentidos, como por ejemplo su MAC centralizado [24], será inevitablemente necesaria para hacer frente al reto que supone ofrecer un acceso *indoor* de acuerdo a las expectativas de 5G en términos de capacidad y fiabilidad [4].

La idea de operar tecnología LTE en banda sin licencia es relativamente reciente [43], y dado que la gran mayoría de las redes WiFi operan en la banda ISM, el objetivo es aprovechar 1) el espectro ‘sub-utilizado’ en la banda U-NII, y 2) funcionalidades existentes como *carrier aggregation*. Por lo tanto, LTE-U, denominado *License Assisted Access* (LAA) en el contexto del 3rd Generation Partnership Project (3GPP), operará en la banda U-NII y se está estandarizando a nivel de *Release 13* [26]. Esencialmente, la idea es utilizarlo inicialmente en el *downlink*, es decir, transmitir los datos de usuario en la banda sin licencia mientras que la (siempre sensitiva) información de control se mantiene en el espectro licenciado mediante un *anchor channel*. Adicionalmente, y en paralelo, ciertas iniciativas propietarias también pretenden desarrollar sistemas para ‘extender’ los beneficios de LTE al espectro sin licencia. Muy recientemente en el pasado *Mobile World Congress 2016*, en Barcelona, se realizó el lanzamiento de *MulteFire Alliance*, consorcio que desarrolla la tecnología *MulteFire* [44], un sistema que a diferencia de LAA, funciona *stand-alone*, es decir, por completo (*downlink/uplink* y plano de control/usuario) en banda sin licencia. En cualquier caso, propietario o no, operar tecnología celular en bandas sin licencia abre un debate interesante: la **coexistencia** entre distintos tipos de acceso radio; y plantea interesantes preguntas: ¿es beneficioso desde el punto de vista de capacidad operar LTE en banda sin licencia considerando la presencia de WiFi y la interferencia de otros operadores?, ¿qué tan grande será el impacto en las redes WiFi?, y ¿cómo mejorar la coexistencia?.

B. Coexistencia

El problema de la coexistencia entre las tecnologías celulares y WLAN, más específicamente, entre LTE-U y WiFi, se debe esencialmente a la naturaleza del diseño de la MAC de cada tecnología. Mientras que WiFi implementa *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA/CA), un esquema distribuido en donde solo se toma el canal si este está ‘disponible’, LTE opera con un *scheduler*, un esquema centralizado que determina que usuario hará uso del canal, maximizando el uso de los recursos radio al adaptarse al estado (estimado) del canal; de esta forma el sistema es más robusto a las interferencias. Además, mientras LTE implementa *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) y usualmente opera en *Frequency Division Duplex* (FDD); el esquema CSMA/CA de WiFi, basado en *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), se considera como un *Time Division Multiple Access* (TDMA) probabilístico que opera en modo *Time Division Duplex* (TDD). Todas estas

³Para una descripción completa de las características técnicas de las redes IEEE 802.11, y sus evoluciones, el lector es referido a [17, 18].

diferencias y la carencia de mecanismos de coordinación y manejo de interferencia mutua entre diferentes *Radio Access Technologies* (RATs) complican significativamente establecer un modelo matemático factible para estudiar el problema de la coexistencia entre estas tecnologías. A la luz de esta situación, el 3GPP ha propuesto en [45] algunos esquemas, que dependiendo de la región geográfica son o no obligatorios [26], para facilitar la coexistencia:

- *Listen-Before-Talk* (LBT): en donde ‘se escucha’ el canal antes de transmitir,
- *Dynamic frequency/carrier selection*: en donde se intenta ‘buscar otro canal’ disponible, y
- *Duty-Cycle* (DC): en donde ‘se libera’ el canal de forma periódica para permitir las transmisiones de WiFi.

Dada la relevancia de este problema, se han propuesto una amplia variedad de mecanismos de coexistencia derivados de los 3 métodos básicos descritos anteriormente así como estudios/evaluaciones de rendimiento⁴. Ejemplos se pueden encontrar en [43, 46–54]. En todos estos estudios y propuestas, queda bastante claro que la coexistencia entre estas dos tecnologías no solamente es posible, sino que es aconsejable. Los resultados y conclusiones reportados en [44] confirman esta afirmación, siendo LTE-U mejor vecino de WiFi que el propio WiFi. Además, en opinión de los autores de este artículo, no estamos frente a un choque de dos tecnologías en disputa por sobrevivir, sino más bien en un contexto en donde tecnologías complementarias, una bien establecida y otra por venir, con seguridad se ajustarán y coexistirán de forma armónica. Como se dijo antes, este trabajo aborda el tema de la coexistencia en interiores desde una perspectiva diferente: **desde el punto de vista de planificación/optimización**. A continuación se introducen algunas particularidades de este problema.

IV. ACCESO EN INTERIORES

El objetivo de esta sección es 1) explicar la necesidad de un acceso con tecnología celular para interiores, y 2) introducir algunos aspectos que deben ser considerados antes de introducir el marco de trabajo propuesto en la siguiente sección.

A. ¿Realmente es necesario planificar el acceso radio?

A la luz de la creciente complejidad de los sistemas de comunicaciones móviles, se ha identificado la necesidad de automatizar ciertas tareas y funciones de la red. Por lo tanto, el interés en conceptos como *Self-Optimized Networks* (SON) [55, 56] ha aumentado significativamente. No obstante, sería muy temerario afirmar que se podrá prescindir por completo de una mínima planificación y/o dimensionamiento en el despliegue de una red.

Tradicionalmente, el acceso inalámbrico en interiores se puede realizar a través de la red celular, conectándose a una macro, micro, ó pico-celda ‘cercana’, ó bien a través de una WLAN, como WiFi. El acceso celular se ‘garantizaba’ considerando un cierto margen ó pérdida por penetración

⁴Igualmente importante, aunque fuera del ámbito de este trabajo, está la coexistencia entre diferentes operadores celulares en el contexto de LTE-U [26], es decir, *Inter-operator Unlicensed Spectrum Sharing*.

cuando se realizaban cálculos básicos de cobertura en el llamado *link budget* [24]. En cuanto a las redes WiFi, y a pesar de que existen ciertos criterios para planificación [57], en la práctica los despliegues se hacen siguiendo criterios más o menos empíricos (cálculos básicos de capacidad y cobertura) y son, de hecho, bastante condicionados por las limitaciones existentes. Sin embargo, debido a algunas limitaciones de las WLAN y a los ambiciosos objetivos que se plantean para *indoors* en 5G, 1) la idea de proveer acceso radio con tecnología celular de forma dedicada, y 2) la necesidad de una planificación adecuada, ganan cada vez más interés [58–61].

Para llevar a cabo un despliegue celular *indoor de forma óptima* se requiere caracterizar de forma muy precisa la propagación radio, que por un lado es particular de cada entorno, y que por el otro no puede obtenerse utilizando modelos de propagación estadísticos/empíricos más convencionales como los que se han utilizado en la planificación de exteriores [62, 63]. Además, el modelado de la interferencia es muy importante [26], pero no sencillo. Si a esto se añade el ingrediente adicional de LTE-U de tener que minimizar el impacto en redes WiFi pre-existentes, diferentes en muchos aspectos (y con las cuales habrá ninguna o poca ‘coordinación’), que operan en la misma banda de frecuencia, entonces el modelado y la subsecuente planificación/optimización del sistema se complica aún más. Por lo tanto, a pesar de que existen como ya se ha mencionado, mecanismos de coexistencia, una planificación adecuada puede hacerlos aún más efectivos de modo que se haga el mejor uso del recurso más valioso en comunicaciones móviles: el ancho de banda.

B. Otros aspectos relevantes: una mirada rápida

1) *Modelos de canal y propagación*: Para caracterizar la propagación *indoor* de forma adecuada, es importante tener en cuenta que la propagación multi-camino (*multi-path*) es el efecto dominante debido a la naturaleza del entorno. Además, el tipo de estructuras y los materiales también juegan un papel crucial [64]. Con la aparición de MIMO y la potencial utilización de ondas milimétricas, la investigación acerca de modelos de canal adecuados para interiores se ha intensificado y ha adquirido más relevancia [65–69]. A día de hoy, los métodos determinísticos basados en *Ray-Tracing* (RT) [70] son los más precisos, y numerosas herramientas están disponibles comercialmente [71]. Además, nuevas técnicas continúan apareciendo; la presentada en [72], por ejemplo, está basada en escaneo con *laser* y se obtienen resultados muy precisos. Finalmente, con la creciente disponibilidad de modelos digitales 3D y el diseño asistido por computador, el uso de métodos determinísticos seguirá en aumento.

2) *Interferencia*: Siempre que el objetivo sea estudiar el comportamiento de una red de comunicaciones inalámbricas a través modelos matemáticos más o menos tratables, pero que reflejen el comportamiento del sistema y la interacción entre las variables de diseño más importantes, el análisis y los modelos estadísticos para la interferencia son fundamentales [73]. Excelentes contribuciones se pueden encontrar en [74–78]. Es esencial caracterizar la interferencia en términos estadísticos,

es decir, modelar la interferencia como una variable aleatoria y estimar o calcular su distribución. En algunos trabajos, la interferencia agregada es aproximada utilizando variables aleatorias Gaussianas. Otros modelos utilizan geometría estocástica [79] para modelar la ‘topología’ de los nodos que generan la interferencia y aproximar la distribución de esta última. Estos modelos, en mayor o menor medida asumen ciertos supuestos que en la práctica a menudo no se corresponden completamente con la realidad, pero que como se explicará más adelante, permiten desarrollar modelos aproximados.

3) *Backhaul*: Otro aspecto de importancia que queremos mencionar y que en general se debe tener en cuenta a la hora de desplegar nodos de baja potencia (cobertura reducida), es la tecnología empleada para conectar los nodos entre si y a la red, es decir, el *backhaul*. A día de hoy el cableado en interiores se realiza utilizando mayormente cobre y el mejor cable disponible actualmente, Categoría 7, permite tasas de hasta 10 Gbps. IEEE prepara las especificaciones del Categoría 8, que permitiría transportar 40 Gbps. Sin embargo, a la luz de como evolucionan las tecnologías de comunicaciones inalámbricas, ¿hace sentido en todos los casos continuar cableando y re-cableando los edificios?, ó ¿se debe ya pensar en utilizar fibra óptica u otro tipo de solución?. De hecho, conviene mencionar que las soluciones que contemplan utilizar enlaces radio (por ejemplo celulares, microondas, etc) para el *backhaul* y otras tecnologías como *Free Space Optics* (FSO) ganan ‘momentum’ (así como la investigación en torno a estas [80–82]), y que conceptos como *Cloud-RAN* [83] requieren en este sentido soluciones fiables y de gran capacidad.

4) *Evaluación de rendimiento*: El proceso de planificación y optimización tal cual se presenta más adelante, requiere realizar comparaciones entre diferentes topologías de red. Esencialmente, existen dos formas de analizar o medir el rendimiento que se puede obtener con una configuración de red dada: simulaciones de sistema y modelos matemáticos.

Simulaciones de sistema. Las simulaciones de sistema proveen la mejor aproximación de los procesos que ocurren en un sistema real y complejo, como por ejemplo, una red LTE; y a menudo con resultados prácticamente idénticos a la realidad. Sin embargo, por más avanzado que un simulador pueda ser, es imposible predecir o emular con total exactitud, y en todos los escenarios, el rendimiento de un sistema de comunicaciones móviles. Esto es así porque muchos procesos como la propagación radio son simplemente demasiado complejos y se requieren modelos y aproximaciones. Sin embargo, las simulaciones de sistema son costosas en términos computacionales y por ello su uso es muy específico.

Modelos analíticos. Los modelos matemáticos se construyen a partir de ciertos supuestos y simplificaciones que permiten crear objetos abstractos que capturan el comportamiento de un sistema⁵ complejo como una red celular, pero que a la vez son compactos y ‘fáciles’ de evaluar. Además, permiten mejorar la comprensión de las relaciones entre los diferentes

⁵Es importante tener en cuenta que no toda idea, concepto, ó procedimiento implementado en un sistema real se puede modelar matemáticamente.

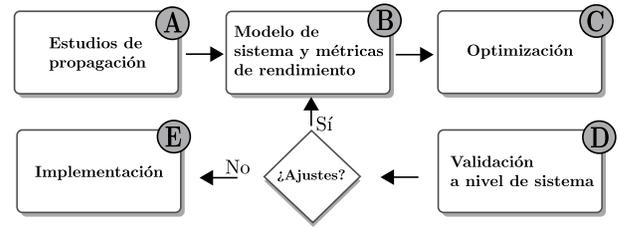


Fig. 1. Planificación y optimización LTE-U: interiores.

parámetros y variables de sistema, de esta forma aportando intuición que es útil a la hora de diseñar u optimizar.

Por lo tanto, teniendo en cuenta las características de ambos métodos, presentamos a continuación un marco de trabajo que combina ambas técnicas.

V. UN MÉTODO PARA PLANIFICACIÓN Y OPTIMIZACIÓN

En esta sección presentamos un marco de trabajo para planificación de redes LTE-U en interiores, en donde se toma en cuenta la existencia de otro despliegue WiFi. En términos generales, la planificación del acceso radio comprende determinar la cantidad y localización de los puntos de acceso, LTE-U en este caso. Por una parte, la cantidad de nodos dependerá principalmente del volumen de tráfico que se desea manejar, mientras que la localización óptima de los nodos en el área de cobertura es un problema bastante más complejo. No obstante, en la práctica, los puntos de acceso han de situarse en sitios que sean factibles, y por lo tanto, para tomar en cuenta este aspecto, se puede partir de un conjunto de ubicaciones posibles (UP) y realizar la planificación y optimización en base a dicho conjunto. Además se han de tener en cuenta los criterios de cobertura y el impacto de la red WiFi existente. La Figura 1 indica las etapas comprendidas en el marco de trabajo propuesto; las cuales se describen a continuación.

A. Estudios de propagación

El objetivo es simular la propagación radio (obtener la pérdida media por propagación) entre cada punto del área de cobertura y cada 1) punto de acceso WiFi, y 2) UP LTE-U. Se asume que al área *indoor* a la cual se pretende dar cobertura (\mathcal{A}) está dividida en un conjunto de A pequeños píxeles (es decir, $|\mathcal{A}| = A$) en los cuales la potencia recibida, y por lo tanto la SINR, son constantes. Por lo tanto, luego de esta etapa se han de obtener un conjunto de matrices de propagación $\mathbf{G}_W \in \mathbb{R}^{A \times L_W}$ y $\mathbf{G}_U \in \mathbb{R}^{A \times L_U}$, en donde L_W y L_U corresponden al número de puntos de acceso WiFi y UP LTE-U, respectivamente. De esta forma, el elemento en la a^a fila y l^a columna⁶ indica la ganancia media del canal entre el a^o píxel en \mathcal{A} y el l^o nodo, bien WiFi ó LTE-U. Como se indicó antes, debido a la naturaleza de la propagación en interiores, se propone la utilización de RT.

B. Modelo de sistema y métricas de rendimiento

En esta etapa se debe definir el modelo matemático para el sistema y las métricas de rendimiento de interés. Parte del

⁶La notación $\mathbf{G}(a, l)$ indica el elemento en la a^a fila y l^a columna de \mathbf{G} .

modelo de sistema esta parcialmente basado en el modelo utilizado en [84]. Dicho modelo de sistema permite un análisis estadístico de todo el área de cobertura de modo que se pueden calcular valores de rendimiento medios para cada configuración de red sin necesidad de realizar simulaciones de sistema. No obstante, es importante indicar que, pese a partir de un modelo de sistema similar, el problema tratado aquí es significativamente diferente al problema de estudio en [84] (eficiencia energética en *outdoors*). Por lo tanto, nuevas funciones objetivo (con su correspondiente optimización) y nuevos elementos del modelo sistema han sido desarrollados. Para estudiar este problema se propone considerar el *downlink* de una red OFDMA como modelo para la red LTE-U que se pretende planificar, y que como se dijo tiene como máximo L_U nodos. La red WiFi ya desplegada, que consiste en L_W puntos de acceso, es modelada como una red TDMA. Asumimos que ambas redes utilizan un único canal cuyo ancho de banda es B . La generalización a más de un canal a partir del modelo presentado aquí no es complicada. No se presenta aquí por mantener la exposición lo más simple posible.

La potencia recibida en cada píxel proveniente de cada nodo se estima considerando la potencia transmitida y la ganancia media del canal. Se definen los vectores $\mathbf{p}_W \in \mathbb{R}^{L_W}$ y $\mathbf{p}_U \in \mathbb{R}^{L_U}$ para indicar la potencia de transmisión de cada nodo. Además en el caso de la red LTE-U, el vector $\mathbf{x} \in \{0, 1\}^{L_U}$ indica una posible topología de red. Es decir, $\mathbf{x}(l) = 1$ indica que existe un nodo LTE-U en la l^a UP, de otro modo no existe nodo LTE-U (al menos no activo) en dicha posición. Por lo tanto, \mathbf{x} es la variable de optimización desde la perspectiva de planificación. Lógicamente, la cantidad de nodos LTE-U en una topología dada corresponde a la suma de los elementos en \mathbf{x} . De esta forma, si tenemos L_U UP, entonces es posible crear $2^{L_U} - 1$ diferentes topologías ó redes LTE-U. Comparar las topologías de red utilizando simulaciones de sistema podría resultar no factible incluso para un número pequeño de UP, y por consiguiente, proponemos utilizar un modelo estadístico. Las matrices de potencia recibida $\mathbf{R}_W \in \mathbb{R}^{L_W}$ y $\mathbf{R}_U \in \mathbb{R}^{L_U}$ para las redes WiFi y LTE-U, respectivamente, se pueden crear como sigue: $\mathbf{R}_W = \mathbf{G}_W \cdot \mathbf{p}_W$ y $\mathbf{R}_U = \mathbf{G}_U \cdot \mathbf{p}_U \cdot \mathbf{x}$. La cobertura de cada nodo, se determina utilizando el criterio de potencia máxima recibida⁷. De esta forma, el píxel a (a^a fila en \mathbf{R}_U) está servido/asociado por el nodo LTE-U l^* si

$$l^* = \underset{l \in \{1, 2, \dots, L\}}{\operatorname{argmax}} \quad \mathbf{R}_U(a, l). \quad (1)$$

A partir de esta regla de asociación, se pueden crear las matrices de cobertura $\mathbf{S}_U \in \{0, 1\}^{A \times L_U}$ y $\mathbf{S}_U^c \in \{0, 1\}^{A \times L_U}$. Si el a^o píxel está asociado al l^o nodo LTE-U, entonces $\mathbf{S}_U(a, l) = 1$, y el resto de elementos de esa a^a fila es 0, de modo que se asume que cada píxel es servido por un solo nodo. \mathbf{S}_U^c es el complemento binario de \mathbf{S}_U . Note que \mathbf{S}_U y \mathbf{S}_U^c son funciones de \mathbf{x} , lo cual no esta indicado explícitamente por mantener la notación lo más simple posible.

⁷Por simplicidad, y sin pérdida de generalidad, asumimos que la potencia de las señales pilotos (que se utilizan para establecer la cobertura en sistemas reales como LTE) y la potencia en los canales de datos es la misma.

1) *Demanda*: Dado que la red WiFi ya esta desplegada, es realista asumir que las cargas de los diferentes puntos de acceso es conocida en términos estadísticos. Así el vector $\boldsymbol{\alpha} \in \mathbb{R}^{L_W}$ indica la carga media de cada punto de acceso, en un periodo de tiempo de interés. En el caso de la red LTE-U, se asume que el operador conoce el volumen V del tráfico que desea servir, en términos del número medio de usuarios, y la distribución espacial del mismo. Está última, se representa por medio del vector $\boldsymbol{\Gamma}_U \in \mathbb{R}^A$ que indica la probabilidad de cada píxel, en el evento de un nuevo usuario, de tener el usuario en el. Por lo tanto, $\boldsymbol{\Gamma}_U^T \cdot \mathbf{1} = 1$. Note que si se asume una distribución uniforme de usuarios, entonces $\boldsymbol{\Gamma}_U(a) = 1/A, \forall a \in \mathcal{A}$.

2) *SINR, criterios de cobertura, y capacidad de enlace*: De acuerdo al modelo de sistema anterior, el vector $\boldsymbol{\Psi} \in \mathbb{R}^A$ que contiene el SINR correspondiente a cada píxel está dado por $\boldsymbol{\Psi} = \mathbf{P}^u \oslash \mathbf{I}$, en donde $\mathbf{P}^u = (\mathbf{S}_U \odot \mathbf{G}_U) \cdot (\mathbf{p}_U \odot \mathbf{x}_U)$ y

$$\mathbf{I} = ((\mathbf{S}_U^c \odot \mathbf{G}_U) \cdot (\mathbf{p}_U \odot \mathbf{x}_U)) \oplus \sigma^2 + \mathbf{I}_W. \quad (2)$$

Los operadores \odot , \odot , y \oplus indican operaciones matriciales elemento-a-elemento (división, multiplicación, y suma). σ^2 es la potencia de ruido. \mathbf{I}_W corresponde a la interferencia proveniente de la red WiFi cuya definición se detalla más adelante. Se considera que el a^o píxel está fuera de cobertura, si las siguientes condiciones no están satisfechas:

- Potencia útil/mínima recibida: $\mathbf{R}_U(a, l^*) \geq P_{\min}^{\text{RX}}$.
- SINR mínima: $\boldsymbol{\Psi}(a) \geq \psi_{\min}$.

El vector $\boldsymbol{\eta} \in \mathbb{R}^A$ contiene la eficiencia espectral que se tendría en cada píxel. La eficiencia espectral se obtiene utilizando una función no decreciente del SINR. En este trabajo se considera la fórmula de Shannon, es decir $\boldsymbol{\eta}(a) = \log_2(1 + \boldsymbol{\Psi}(a))$. Para ‘penalizar’ topologías con píxeles fuera de cobertura, la eficiencia espectral se calcula como sigue: $\boldsymbol{\eta}(a) = c(a) \cdot \log_2(1 + \boldsymbol{\Psi}(a))$, donde

$$c(a) = u(\boldsymbol{\Psi}(a) - \psi_{\min}) \cdot u(\mathbf{R}_U(a, l^*) - P_{\min}^{\text{RX}}). \quad (3)$$

La función $u(\cdot)$ es la función escalón unitario, de este modo $u(z) = 1$ si $z \geq 0$, y 0 en otro caso. Note que (3) define el vector $\mathbf{c} \in \{0, 1\}^A$ (que obviamente es una función de \mathbf{x} porque \mathbf{R}_U lo es) que indica que píxeles están fuera de cobertura. Así, si $c(a) = 1$, el a^o píxel tiene cobertura, de otro modo el píxel no tiene cobertura. El porcentaje de \mathcal{A} que esta fuera de cobertura (κ_o) está dado por

$$\kappa_o(\mathbf{x}) = 100 \cdot \left[1 - \frac{(\mathbf{c}^T \cdot \mathbf{1})}{A} \right]. \quad (4)$$

3) *Métricas de rendimiento*: Estamos interesados en determinar las topologías LTE-U con el mejor compromiso número de nodos (f_1) y capacidad (f_2). Por lo tanto, podemos escribir el siguiente problema de optimización multiobjetivo [85]:

$$\underset{\mathbf{x}}{\operatorname{minimize}} \quad \mathbf{f} = [f_1(\mathbf{x}), -f_2(\mathbf{x})], \quad (5a)$$

subject to:

$$\kappa_o(\mathbf{x}) \leq O_{\max}, \quad (5b)$$

$$\mathbf{x} \in \{0, 1\}^L, \quad \mathbf{x} \neq \mathbf{0}. \quad (5c)$$

En el problema 5, como se mencionó, \mathbf{x} es la variable de optimización y se debe minimizar el vector \mathbf{f} ; es decir minimizar simultáneamente el número de nodos y maximizar la capacidad de la red. Las condiciones (5b) y (5c) corresponden al criterio de cobertura mínima requerida (O_{\max}) y a la definición de soluciones válidas, respectivamente.

Evidentemente, el número de nodos está dado por $f_1 = \mathbf{x}^T \cdot \mathbf{1}$. Para calcular la capacidad de la red condicionado a la actividad de la red WiFi se deben tener algunos aspectos y supuestos en consideración. En este trabajo, asumimos que los nodos LTE-U operan en modo LBT, y por lo tanto es importante determinar la probabilidad con la que cada nodo LTE-U encontrará el canal ‘libre’, es decir, que la cantidad de interferencia recibida sea menor que un cierto umbral I_{TH} . Asumiremos aquí, por simplicidad que la interferencia proveniente de la red WiFi solo se debe a las transmisiones en el *downlink*, lo cual podría ser una buena aproximación si el tráfico es muy asimétrico⁸. La potencia recibida en el l° nodo LTE-U proveniente de la red WiFi en un instante t ($I_l(t)$) está dada por

$$I_l(t) = \sum_{i=1}^{L_W} \mathbf{p}_W(i) \cdot \mathbf{G}_W(a_L^l, i) \cdot z_i(t) = \sum_{i=1}^{L_W} w_i^l \cdot z_i(t), \quad (6)$$

en donde a_L^l indica el píxel correspondiente al l° nodo LTE-U. Los coeficientes w_i^l (independientes de t) corresponden a la potencia recibida en el l° nodo LTE-U si el i° punto de acceso WiFi transmite. Las $z_i(t)$'s son variables aleatorias tipo Bernoulli que determinan si el i° punto de acceso WiFi transmite en el tiempo t . Como se dijo, asumiremos un intervalo de tiempo en el cual la carga media de cada punto de acceso WiFi es conocida (dada por el vector α) en términos estadísticos, y por lo tanto, $\mathbb{E}\{z_i(t)\} = \alpha(i)$. De este modo, la distribución de $I_l(t)$ se puede obtener por métodos clásicos⁹ [86]. Así, definimos ρ_l como la probabilidad de que el l° nodo LTE-U encuentre el canal libre y pueda transmitir. Por lo tanto

$$\rho_l \triangleq \mathbb{P}(I_l \leq I_{\text{TH}}), \quad (7)$$

De este modo, a partir de (7), se puede obtener el vector $\rho \in [0, 1]^{L_W}$ que indica el porcentaje del tiempo en el cual el l° nodo LTE-U puede transmitir, en promedio.

Para obtener el vector \mathbf{I}_W en (2) se debe considerar la potencia media que se recibe en la cobertura de cada nodo LTE-U, a nivel de cada píxel, desde cada punto de acceso WiFi, condicionado a que dicho nodo LTE-U está transmitiendo, es decir, que dicho nodo encuentre el canal libre. Llamemos a esta condición *Positive Clear Channel Assessment* (CCA^+). Por lo tanto, la interferencia que se recibe de la red WiFi en el píxel a , que está en la cobertura del l° nodo LTE-U cuando este ‘ve’ el canal libre (CCA_l^+), está dada por

$$\mathbf{I}_W(a) = \sum_{i=1}^{L_W} \mathbf{p}_W(i) \cdot \mathbf{G}_W(a, i) \cdot \mathbb{E}\{z_i | \text{CCA}_l^+\}, \quad (8)$$

⁸Tomar en cuenta el tráfico en el *uplink*, no obstante, no supone mayores complicaciones; esta generalización será presentada en futuros estudios.

⁹Si L_W es suficientemente grande, I_l puede ser aproximada a una variable Gaussiana. Si no es el caso (L_W pequeño), la distribución puede entonces ser calculada sin mayor esfuerzo computacional.

donde l^* es el índice del nodo LTE-U sirviendo al píxel a , y $\mathbb{E}\{z_i | \text{CCA}_l^+\}$ es una esperanza condicional [86]. Note la dependencia de $\mathbf{I}_W(a)$ con \mathbf{x} ya que l^* es también una función de \mathbf{x} . De esta forma, la capacidad media de la red LTE-U (f_2) se puede calcular como sigue:

$$f_2 = (B \cdot A) \left[[(\boldsymbol{\eta} \odot \boldsymbol{\Gamma}_U)^T \cdot \mathbf{S}_U] \odot \mathbf{n} \odot \boldsymbol{\rho} \right] \cdot \mathbf{1}, \quad (9)$$

en donde el vector $\mathbf{n} \in \mathbb{R}^{L_U}$ contiene el inverso del número de píxeles asociados a cada nodo LTE-U. En el cálculo de f_2 se adopta por convención que si $\mathbf{x}(l) = 0$, entonces $\mathbf{n}(l) = 1$, ya que en tal caso, el l^{th} elemento del vector $(\boldsymbol{\eta} \odot \boldsymbol{\Gamma}_U)^T \cdot \mathbf{S}_U$ (que contiene la capacidad media de cada nodo LTE-U) es igual a zero. El uso conjunto de $\boldsymbol{\Gamma}_U$ y A en (9) captura el impacto de la distribución espacial de tráfico, ponderando más los píxeles donde es más probable tener tráfico. Por lo tanto, f_2 prioriza las topologías que proveen mejor capacidad allí donde los usuarios aparecen con más frecuencia. Finalmente, al incorporar $\boldsymbol{\rho}$ se tiende a priorizar las topologías cuyos nodos encuentran el canal libre con más frecuencia. Dado que el vector $\boldsymbol{\rho}$ no depende de \mathbf{x} , solo se requiere calcular este una vez antes del proceso de optimización de acuerdo a (7).

C. Optimización

El problema de optimización en cuestión es combinatorio, del tipo *NP-hard*; y por lo tanto, se propone la utilización de métodos estocásticos. En este trabajo, se utiliza el bien conocido y fiable algoritmo *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II* (NSGA-II) [87], el cual es considerado una referencia en el campo de la optimización multiobjetivo.

D. Validación

La validación mediante simulaciones de sistema consiste en realizar experimentos utilizando un simulador (*software*) para validar el rendimiento de las topologías optimizadas teniendo en cuenta los aspectos más complejos de cada tecnología. A partir de los resultados de estas pruebas, se puede requerir o no realizar ajustes al modelo matemático.

E. Implementación

Se trata utilizar las soluciones para desplegar una red nueva ó bien para mejorar los algoritmos de gestión de recursos radios de una red ya existente a través de un esquema de *Cell Switch-Off* [84] ó una implementación C-RAN [83].

VI. RESULTADOS

A. Caso de estudio: descripción

Para ilustrar la utilidad del marco de trabajo presentado aquí, se ha considerado la planificación de una red LTE-U en el 2^o piso de la escuela de ingeniería eléctrica de Aalto University, Helsinki. Como se puede ver en la Figura 2, los puntos rojos indican la posición de los puntos de acceso WiFi, mientras que las UP para los nodos LTE-U se indican con cruces azules. El resto de los parámetros utilizados en las evaluaciones numéricas se indican en la Tabla I.

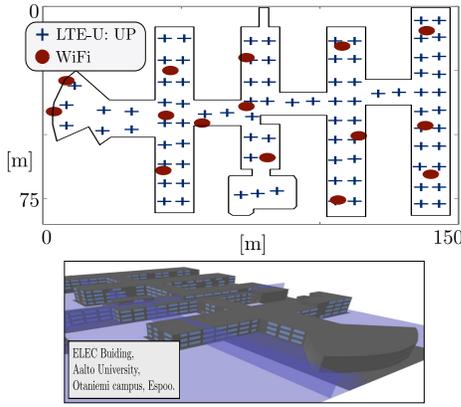


Fig. 2. Caso de estudio para planificación y optimización.

TABLA I
PARÁMETROS UTILIZADOS EN LAS EVALUACIONES NUMÉRICAS.

Modelo de sistema			
L_U	87	L_W	15
Res. píxeles	$0.5 \times 0.5 \text{ m}^2$	A	20968
$p_U(l) \forall l$	15.0 dBm	$p_W(l) \forall l$	17.0 dBm
Frecuencia portadora	5.7 GHz	σ^2	-174 dBm/Hz
B	20.0 MHz	$\Gamma_U(a) \forall a \in \mathcal{A}$	1/A
Antenas	Omní	Ganancia antenas	3 dBi
Altura antenas	3.5 m	P_{\min}^{Rx} (en pilotos)	-126 dBm
ψ_{\min}	-7.0 dB	O_{\max}	2 %
I_{TH} (en el canal)	-94.75 dBm	Cargas en puntos de acceso WiFi: $\alpha(l) \sim U[0.1, 0.9] \forall l$.	
Calibración del algoritmo NSGA-II			
Population size	110	Crossover prob.	1.00
Tipo de variables	Discreta	Mutation prob.	$1/L_U$
Crit. de terminación: ganancia en el <i>hypervolume</i> < 0.001% en 40 generaciones			

B. Resultados numéricos: optimización multiobjetivo

Por limitaciones de espacio, presentamos resultados básicos del proceso de optimización multiobjetivo; etapa 3 en la Figura 1, de acuerdo a (5). La Figura 3 muestra los resultados. Cada punto en el *Frente de Pareto* [85] (soluciones óptimas en el sentido multiobjetivo) representa la mejor topología con el número de nodos (f_1) indicado en el eje x . La capacidad media (f_2) entregada por la red está indicada en el eje y . Como se puede ver, del proceso de optimización se pueden obtener cierta información de interés. Primeramente, se determina cual es el número mínimo de nodos requeridos para obtener el nivel de cobertura deseado; en nuestro caso de estudio, se requieren al menos 23 nodos LTE-U (x_{\min}). Además, el proceso de optimización revela cual es la máxima densidad ‘útil’; en nuestro caso de estudio se tiene que más allá de de 67 nodos (x_{\max}) no es posible obtener ganancias por densificación [6]. Note que utilizar un nodo en cada unas de las localizaciones supone no solo un incremento de 22% en la cantidad de nodos sino que además implica una pérdida de capacidad 9% debido a la excesiva cantidad de interferencia que es generada. De este modo los puntos en el frente de Pareto representan el mejor compromiso costo (f_1) y capacidad (f_2).

La Figura 4 muestra una de estas topologías optimizadas, la que contiene 25 nodos LTE-U, que está indicada como x_{25} en la Figura 3. Es importante recordar que cada conjunto de

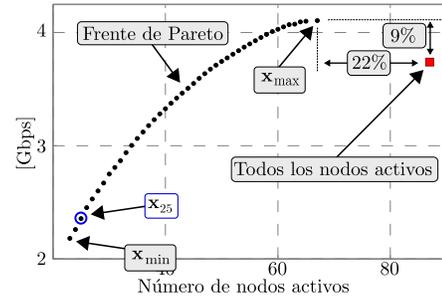


Fig. 3. Optimización multiobjetivo.

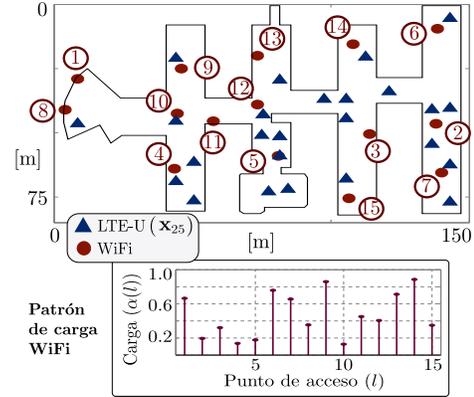


Fig. 4. Ejemplo de topología optimizada con 25 nodos LTE-U y su correspondiente patrón de carga WiFi.

topologías optimizadas son específicas para una distribución espacial de tráfico, un patrón de carga WiFi, y el resto de parámetros que se indican en el modelo sistema. Sin embargo, este proceso de optimización no ha de realizarse en tiempo real, y las diferentes soluciones para una amplia variedad de condiciones, se pueden almacenar en bases de datos y aplicar convenientemente a medida que, por ejemplo, los patrones de tráfico vayan variando en el tiempo. El mapa de SINR resultante para la topología x_{25} se muestra en la Figura 5, en donde se puede verificar que, en interiores, el aislamiento natural de las diferentes estructuras, oficinas y paredes, permite obtener niveles de SINR muy elevados, siempre y cuando, por supuesto, se lleve a cabo una cuidadosa planificación. Finalmente, señalar que aunque en este trabajo se ha considerado como métrica de optimización la capacidad agregada de la red, es posible definir diferentes métricas de acuerdo a la necesidad o interés del operador de la red. Por ejemplo, se podría pensar en maximizar la capacidad de los píxeles con peor cobertura de modo que se mejore el *fairness* de la red, es decir una optimización tipo *max-min*, etc.

VII. CONCLUSIONES Y FUTUROS ESTUDIOS

5G deberá ser, ante todo, un sistema ágil que de alguna forma integre, en un sentido amplio y de forma transparente todos los recursos y sistemas disponibles. La incorporación de espectro sin licencia a la gama de posibilidades de 5G parece ser una necesidad irrenunciable que como se ha visto, no está exenta de dificultades. Este concepto ha generado

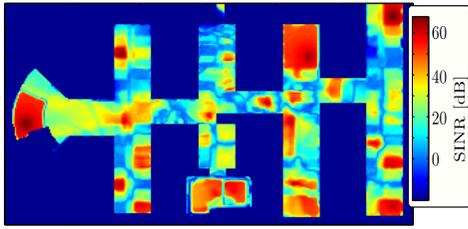


Fig. 5. Mapa de SINR resultante para la topología optimizada de 25 nodos.

mucho interés recientemente en el ámbito del 3GPP, y ya se trabaja en la estandarización de esta idea para LTE, es decir, LAA. No obstante, la problemática de la coexistencia con las redes de área local como WiFi es un *hot-topic* que también está recibiendo mucha atención. En este trabajo, abordamos esta problemática desde la perspectiva de planificación y optimización. Nuestros resultados permiten vislumbrar que la optimización del acceso radio será un elemento clave para mejorar el rendimiento conjunto de ambos sistemas. Sin embargo, aparte del trabajo teórico, será necesario realizar pruebas con despliegues en condiciones reales. Con esta visión, los autores colaboran dentro del contexto del proyecto *Mejorando la Calidad de la Educación Superior a través del Estudio e Implementación de una Red Inalámbrica de 5G*, que es una iniciativa auspiciada por la Secretaria Nacional de Ciencia, Tecnología, e Innovación (SENACYT) de Panamá y orientada a realizar investigación aplicada en este campo. Futuros esfuerzos están alineados en esa dirección.

REFERENCES

- [1] "The Mobile Economy 2015," Groupe Speciale Mobile Association, Tech. Rep., 2015, Online en: www.gsmmobileeconomy.com.
- [2] M. Roberts *et al.*, "Evolution of the air interface of cellular communications systems toward 4G realization," *IEEE Communication Surveys & Tutorials*, vol. 8, no. 1, pp. 2–23, Jan. 2006.
- [3] "More than 50 billion connected devices," Ericsson, Tech. Rep., 2011, disponible online en: www.ericsson.com.
- [4] A. Osseiran *et al.*, "Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 5, pp. 26–35, May 2014.
- [5] F. Boccardi, R. Heath, A. Lozano, T. Marzetta, and P. Popovski, "Five disruptive technology directions for 5G," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 5, pp. 74–80, Feb. 2014.
- [6] J. Andrews *et al.*, "What will 5G be?" *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 6, pp. 1065–1082, Jun. 2014.
- [7] A. Al-Fuqaha *et al.*, "Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications," *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, vol. 17, no. 4, pp. 2347–2376, Fourthquarter 2015.
- [8] A. Aijaz and A. Aghvami, "Cognitive machine-to-machine communications for internet-of-things: A protocol stack perspective," *Internet of Things Journal, IEEE*, vol. 2, no. 2, pp. 103–112, April 2015.
- [9] I. Akyildiz *et al.*, "The internet of bio-nano things," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 53, no. 3, pp. 32–40, March 2015.
- [10] G. Fettweis, "The tactile internet: Applications and challenges," *Vehicular Technology Magazine, IEEE*, vol. 9, no. 1, pp. 64–70, March 2014.
- [11] A. Imran and A. Zoha, "Challenges in 5G: how to empower SON with big data for enabling 5G," *Network, IEEE*, vol. 28, no. 6, Nov 2014.
- [12] D. Wubben *et al.*, "Benefits and impact of cloud computing on 5G signal processing: flexible centralization through cloud-RAN," *Signal Processing Magazine, IEEE*, vol. 31, no. 6, pp. 35–44, Nov 2014.
- [13] Z. Feng, C. Qiu, Z. Feng, Z. Wei, W. Li, and P. Zhang, "An effective approach to 5G: wireless network virtualization," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 53, no. 12, pp. 53–59, Dec 2015.
- [14] Z. Su and Q. Xu, "Content distribution over content centric mobile social networks in 5G," *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 6, pp. 66–72, June 2015.
- [15] A. Al-Dulaimi *et al.*, "5G communications race: Pursuit of more capacity triggers LTE in unlicensed band," *Vehicular Technology Magazine, IEEE*, vol. 10, no. 1, pp. 43–51, March 2015.
- [16] A. Molisch, *Wireless Local Area Networks*. Wiley-IEEE Press, 2011, pp. 731–750.
- [17] T. Cooklev, *The IEEE Standard for WLAN: IEEE 802.11*. Wiley-IEEE Standards Association, 2004, pp. 45–132.
- [18] L. Verma *et al.*, "WiFi on steroids: 802.11AC and 802.11AD," *IEEE Wireless Communications*, vol. 20, no. 6, pp. 30–35, Dec. 2013.
- [19] F. Abinader *et al.*, "Enabling the coexistence of LTE and Wi-Fi in unlicensed bands," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 52, no. 11, pp. 54–61, Nov 2014.
- [20] D. Wu, J. Wang, Y. Cai, and M. Guizani, "Millimeter-wave multimedia communications: challenges, methodology, and applications," *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 1, pp. 232–238, Jan. 2015.
- [21] J. Gozalvez, "5G tests and demonstrations [mobile radio]," *Vehicular Technology Magazine, IEEE*, vol. 10, no. 2, pp. 16–25, June 2015.
- [22] P. Poposky *et al.*, "Final report on the METIS 5G system concept and technology roadmap," Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty information Society (METIS), Tech. Rep., April 2015, deliverable D6.6, v1.
- [23] R. Daniels *et al.*, "60 GHz wireless: up close and personal," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 11, no. 7, pp. 44–50, Dec. 2010.
- [24] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, *4G: LTE/LTE-advanced for mobile broadband*. Academic press, 2013.
- [25] G. Yuan, X. Zhang, W. Wang, and Y. Yang, "Carrier aggregation for LTE-advanced mobile communication systems," *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 2, pp. 88–93, February 2010.
- [26] R. Zhang, M. Wang, L. Cai, Z. Zheng, and X. Shen, "LTE-unlicensed: the future of spectrum aggregation for cellular networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 22, no. 3, pp. 150–159, Jun. 2015.
- [27] J. Andrews, "Seven ways that HetNets are a cellular paradigm shift," *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 3, pp. 136–144, Mar. 2013.
- [28] H. Dhillon *et al.*, "Modeling and analysis of K-tier downlink heterogeneous cellular networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 30, no. 3, pp. 550–560, Apr. 2012.
- [29] D. González G. and J. Hämäläinen, "Looking at cellular networks through canonical domains and conformal mapping," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. PP, no. 99, pp. 1–15, 2016.
- [30] K. Smiljkovikj *et al.*, "Analysis of the decoupled access for downlink and uplink in wireless heterogeneous networks," *IEEE Communication Letters*, vol. 4, no. 5, pp. 173–176, Apr. 2015.
- [31] E. Bjornson, L. Sanguinetti, J. Hoydis, and M. Debbah, "Optimal design of energy-efficient multi-user MIMO systems: is massive MIMO the answer?" *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 6, pp. 3059–3075, June 2015.
- [32] V. Guruswami and P. Xia, "Polar codes: speed of polarization and polynomial gap to capacity," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 61, no. 1, pp. 3–16, Jan 2015.
- [33] S. Hong *et al.*, "Applications of self-interference cancellation in 5G and beyond," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 114–121, February 2014.
- [34] O. Galinina *et al.*, "5G multi-RAT LTE-WiFi ultra-dense small cells: performance dynamics, architecture, and trends," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 33, no. 6, pp. 1224–1240, Jun. 2015.
- [35] S. Han *et al.*, "Large-scale antenna systems with hybrid analog and digital beamforming for millimeter wave 5G," *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 1, pp. 186–194, January 2015.
- [36] M. O. *et al.*, "5GrEEn: Towards green 5G mobile networks," in *Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), 2013 IEEE 9th International Conference on*, Oct 2013, pp. 212–216.
- [37] "Title 47: Telecommunication, Part 15: Radio Frequency Devices," Federal Communication Commission, Tech. Rep., 2015, disponible online en: www.fcc.gov.
- [38] T. *et al.* W., *OSI Reference Model - The ISO Model of Architecture for Open Systems Interconnection*. Wiley-IEEE Press, 2007, pp. 599–606.
- [39] *LTE Small Cell vs WiFi User Experience*, Huawei, 2013, Online at: www.huawei.com.
- [40] K. Lee *et al.*, "Mobile data offloading: How much can WiFi deliver?" *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 21, no. 2, pp. 536–550, April 2013.
- [41] J. Lee, Y. Yi, S. Chong, and Y. Jin, "Economics of WiFi offloading:

- Trading delay for cellular capacity," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, no. 3, pp. 1540–1554, March 2014.
- [42] M. Paolini, *Beyond data caps. An analysis of the uneven growth in data traffic*, Senza Fili Consulting, Feb. 2011, Online at: www.senzafiliconsulting.com.
- [43] "LTE in Unlicensed Spectrum: Harmonious Coexistence with Wi-Fi," Qualcomm Technologies, Inc., Tech. Rep., Jun 2014, Online en: www.qualcomm.com.
- [44] "LTE-U/LAA, MuLTEfire and Wi-Fi; making best use of unlicensed spectrum," Qualcomm Technologies, Inc., Tech. Rep., 2015, Online en: www.qualcomm.com.
- [45] "Licensed-Assisted Access to Unlicensed Spectrum; (Rel. 13)," 3GPP, Tech. Rep., Nov 2014, v0.1.1.
- [46] C. Cano and D. Leith, "Coexistence of WiFi and LTE in unlicensed bands: a proportional fair allocation scheme," in *2015 IEEE Int. Conf. on Communication Workshop (ICCW)*, June 2015, pp. 2288–2293.
- [47] A. Voicu et al, "Coexistence of pico- and femto-cellular LTE-unlicensed with legacy indoor Wi-Fi deployments," in *2015 IEEE Int. Conf. on Communication Workshop (ICCW)*, June 2015, pp. 2294–2300.
- [48] Y. Jian et al, "Coexistence of Wi-Fi and LAA-LTE: experimental evaluation, analysis and insights," in *2015 IEEE Int. Conf. on Communication Workshop (ICCW)*, June 2015, pp. 2325–2331.
- [49] P. Xia, Z. Teng, and J. Wu, "How loud to talk and how hard to listen-before-talk in unlicensed LTE," in *2015 IEEE Int. Conf. on Communication Workshop (ICCW)*, June 2015, pp. 2314–2319.
- [50] O. Sallent et al, "Learning-based coexistence for LTE operation in unlicensed bands," in *2015 IEEE Int. Conf. on Communication Workshop (ICCW)*, June 2015, pp. 2307–2313.
- [51] A. Mukherjee et al, "System architecture and coexistence evaluation of licensed-assisted access LTE with IEEE 802.11," in *2015 IEEE Int. Conf. on Communication Workshop (ICCW)*, June 2015, pp. 2350–2355.
- [52] F. Chaves et al, "LTE UL power control for the improvement of LTE/Wi-Fi coexistence," in *2013 IEEE 78th Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, Sept 2013, pp. 1–6.
- [53] S. Sagari et al, "Modeling the coexistence of LTE and WiFi heterogeneous networks in dense deployment scenarios," in *2015 IEEE Int. Conf. on Communication Workshop (ICCW)*, June 2015, pp. 2301–2306.
- [54] S. Hajmohammad et al, "Fine-tuning the femtocell performance in unlicensed bands: Case of WiFi co-existence," in *2014 Int. Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, Aug 2014, pp. 250–255.
- [55] E. M. Diaz, E. T. Marquez, L. M. d. A. Recio, and I. B. F. d. Murias, "SON use case study "energy saving" for LTE eNBs," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 8, no. 2, pp. 184–189, April 2010.
- [56] H. Y. Lateef et al, "LTE-advanced self-organizing network conflicts and coordination algorithms," *IEEE Wireless Communications*, vol. 22, no. 3, pp. 108–117, June 2015.
- [57] M. Gast, *802.11 wireless networks: the definitive guide*. O'Reilly Media, Inc., 2005.
- [58] N. Poosamani and I. Rhee, "Towards a practical indoor location matching system using 4G LTE PHY layer information," in *2015 IEEE Int. Conf. on Pervasive Computing and Communication Workshops*, March 2015, pp. 284–287.
- [59] S. Lamas, D. González G., and J. Hämäläinen, "Indoor planning optimization of ultra-dense cellular networks at high carrier frequencies," in *2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, March 2015, pp. 23–28.
- [60] M. Shajan and K. Patel, "Minimizing interference by indoor-cell of 4G LTE networks," in *Communication Systems and Network Technologies, 2015 Fifth International Conference on*, April 2015, pp. 249–252.
- [61] E. Semaan, F. Harrysson, A. Furuskar, and H. Asplund, "Outdoor-to-indoor coverage in high frequency bands," in *Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 2014, Dec 2014, pp. 393–398.
- [62] M. Hata, "Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 29, no. 3, pp. 317–325, Aug 1980.
- [63] G. Y. Delisle, J. P. Lefevre, M. Lecours, and J. Y. Chouinard, "Propagation loss prediction: A comparative study with application to the mobile radio channel," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 34, no. 2, pp. 86–96, May 1985.
- [64] A. A. Saleh and R. A. Valenzuela, "A statistical model for indoor multipath propagation," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 5, no. 2, pp. 128–137, 1987.
- [65] A. Kaya and L. Greenstein, "A new path loss modeling approach for in-building wireless networks," in *Global Communications Conference (GLOBECOM), 2012 IEEE*, Dec 2012, pp. 5033–5037.
- [66] E. Torkildson, U. Madhow, and M. Rodwell, "Indoor millimeter wave MIMO: feasibility and performance," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 10, no. 12, pp. 4150–4160, Dec. 2011.
- [67] A. Hammoudeh and G. Allen, "Millimetric wavelengths radiowave propagation for line-of-sight indoor microcellular mobile communications," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 44, no. 3, pp. 449–460, Aug 1995.
- [68] S. L. H. Nguyen, K. Haneda, J. Jarvelainen, A. Karttunen, and J. Putkonen, "On the mutual orthogonality of millimeter-wave massive MIMO channels," in *2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference*, May 2015, pp. 1–5.
- [69] J. Jarvelainen, M. Kurkela, and K. Haneda, "Impacts of room structure models on the accuracy of 60 GHz indoor radio propagation prediction," *IEEE Communications Magazine*, vol. 14, pp. 1137–1140, May 2015.
- [70] C.-F. Yang, B.-C. Wu, and C.-J. Ko, "A ray-tracing method for modeling indoor wave propagation and penetration," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 46, no. 6, pp. 907–919, Jun 1998.
- [71] *WallMan: User reference guide*, WinProp ProMan user reference and indoor scenarios, AWE Communications GmbH, Online at: www.awe-communications.com.
- [72] K. Haneda et al, "Spatial coexistence of millimeter-wave distributed indoor channels," in *2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference*, May 2015, pp. 1–5.
- [73] M. Aljuaid and H. Yanikomeroglu, "Investigating the gaussian convergence of the distribution of the aggregate interference power in large wireless networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 9, pp. 4418–4424, Nov 2010.
- [74] A. Ghasemi and E. S. Sousa, "Interference aggregation in spectrum-sensing cognitive wireless networks," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 2, no. 1, pp. 41–56, Feb 2008.
- [75] J. S. Evans and D. Everitt, "On the teletraffic capacity of cdma cellular networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 48, no. 1, pp. 153–165, Jan 1999.
- [76] H. Tabassum, Z. Dawy, E. Hossain, and M.-S. Alouini, "Interference statistics and capacity analysis for uplink transmission in two-tier small cell networks: a geometric probability approach," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, no. 7, pp. 3837–3852, Jul. 2014.
- [77] R. Heath, M. Kountouris, and T. Bai, "Modeling heterogeneous network interference using Poisson Point Processes," *1053-587X*, vol. 61, no. 16, pp. 4114–4126, Aug. 2013.
- [78] C. Seol and K. Cheun, "A statistical inter-cell interference model for downlink cellular OFDMA networks under log-normal shadowing and multipath Rayleigh fading," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 57, no. 10, pp. 3069–3077, Oct. 2008.
- [79] M. Haenggi et al, "Stochastic geometry and random graphs for the analysis and design of wireless networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 27, no. 7, pp. 1029–1046, September 2009.
- [80] R.-A. Pitaval et al, "Full-duplex self-backhauling for small-cell 5G networks," *Wireless Communications, IEEE*, vol. 22, no. 5, pp. 83–89, October 2015.
- [81] J. Fakidis, S. Kucera, H. Claussen, and H. Haas, "On the design of a free space optical link for small cell backhaul communication and power supply," in *2015 IEEE Int. Conf. on Communication Workshop (ICCW)*, June 2015, pp. 1428–1433.
- [82] R. V. et al, "Q-band millimeter-wave antennas: an enabling technology for multigigabit wireless backhaul," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 15, no. 4, pp. 121–130, June 2014.
- [83] J. Wu, Z. Zhang, Y. Hong, and Y. Wen, "Cloud radio access network (C-RAN): a primer," *IEEE Network*, vol. 29, no. 1, pp. 35–41, Jan 2015.
- [84] D. González G., H. Yanikomeroglu, M. Garcia-Lozano, and S. Ruiz, "A novel multiobjective framework for cell switch-off in dense cellular networks," in *2014 IEEE Int. Conf. on Communications (ICC)*, June 2014, pp. 2641–2647.
- [85] Y. Sawaragi, I. Hirotaka, and T. Tanino, *Theory of Multiobjective Optimization*, 1st ed. Academic Press, Inc., 1985.
- [86] A. Papoulis and S. U. Pillai, *Probability, random variables, and stochastic processes*. Tata McGraw-Hill Education, 2002.
- [87] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, "A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 2, pp. 182–197, Apr. 2002.