



Modelado del control de potencia del enlace ascendente para redes heterogéneas y densas basadas en OFDMA

Luis Diez y Ramón Agüero

Departamento de Ingeniería de Comunicaciones, Universidad de Cantabria
Plaza de la Ciencia s.n. 39005, Santander, Cantabria. España
{ldiez, ramon}@tlmat.unican.es

Resumen—En este trabajo se presenta un modelado novedoso del enlace ascendente en redes heterogéneas, que se ha planteado para su uso en simulación a nivel de sistema. A diferencia de otros trabajos, el modelo propuesto tiene en cuenta la interferencia mutua causada por las conexiones de otros usuarios, y establece los niveles de potencia mínimos necesarios para satisfacer una Relación Señal a Ruido e Interferencia (SINR) arbitraria. El planteamiento da lugar a un problema de optimización lineal que se puede resolver de manera sencilla con diferentes herramientas. A fin de validar el modelo, se ha comparado el rendimiento obtenido al aplicarlo con el observado al utilizar un esquema tradicional de lazo cerrado, implementado de forma iterativa. El análisis demuestra que el modelo propuesto proporciona, en una sola iteración, los mismos resultados que los métodos de simulación iterativos, permitiendo, por lo tanto, reducir la complejidad de las simulaciones. Finalmente, se ha estudiado el comportamiento del modelo en escenarios heterogéneos, haciendo uso de diferentes técnicas de selección de acceso.

Palabras Clave—Control de potencia, LTE, HetNets, optimización, modelado.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha podido ver la aparición de servicios bi-direccionales, tales como los basados en *Mobile Edge Computing* (MEC) [1], [2], lo que llevará posiblemente a un aumento significativo del volumen de tráfico en el enlace ascendente de las comunicaciones celulares. Por otro lado, la creciente densidad de la red de acceso, así como las diferencias entre los elementos que la componen, plantea nuevos retos para la definición de mecanismos de gestión, cobrando especial relevancia la interferencia entre celdas. Este aspecto es, incluso, más relevante cuando se hace uso de nuevos esquemas de selección de acceso, tales como *cell-range extension* (CRE) o *Downlink Uplink Decoupling* (DUDe).

En este contexto, el control de potencia del enlace ascendente, que minimice el nivel de interferencia, puede mejorar de manera significativa el rendimiento de la red. Al mismo tiempo, incrementar eficiencia la energética

permitiría aumentar la autonomía de los dispositivos de usuario, *User Equipment* (UE).

En análisis de los diferentes mecanismos de gestión en general, y de la gestión de potencia en particular, se suele abordar mediante técnicas de simulación. Dependiendo del nivel de precisión exigido, y la forma en que la red se modela, existen tres tipos principales de simulación [3]: simulación de red, simulación a nivel de enlace y a nivel de sistema.

En el primer tipo se modelan los elementos de red de forma realista, lo que suele requerir la implementación de la pila de protocolos. En el otro extremo, la simulación a nivel de enlace se centra en el comportamiento del enlace radio, típicamente entre un único par transmisor-receptor, y considera aspectos concretos de las capas física y de acceso al medio, así como propagación a pequeña escala temporal; por ejemplo, a nivel de símbolo. Finalmente, la simulación a nivel de sistema busca la caracterización del comportamiento global de la red. En este sentido, este último tipo de simulación se centra en fenómenos que ocurren en escalas temporales mayores que aquellos estudiados a nivel de enlace, tales como selección de acceso o traspasos. Por ello, el modelado a nivel de sistema hace uso de valores estadísticos obtenidos a partir de estudios a nivel de enlace, o modelos analíticos, para tener en cuenta el comportamiento de los enlaces.

A su vez, la simulación a nivel de sistema puede tener dos enfoques distintos, estático o dinámico [3], de acuerdo a la posibilidad de considerar la evolución temporal de la red (por ejemplo, patrones de tráfico o movimiento). La simulación estática se basa en análisis *Monte Carlo*, en los que se usan múltiples fotografías independientes del escenario para obtener figuras de rendimiento, tales como nivel de cobertura. Por otro lado, el enfoque dinámico busca estudiar la evolución temporal del sistema, para lo que se considera que la red cambia a lo largo del tiempo, y la simulación mantiene el estado del sistema

entre fotografías consecutivas. Esta metodología permite analizar parámetros como los traspasos, o incluir patrones de tráfico de servicios.

De las diferentes opciones de simulación, para el estudio de técnicas de control de potencia normalmente se adopta la alternativa a nivel de sistema, usando en enfoque estático o dinámico, en función de los objetivos concretos. En el caso particular de la gestión de potencia en el enlace ascendente para sistemas basados en OFDMA, se han propuestos diferentes modelos, tal como se elaborará en la Sección II. En la mayoría de los estudios se asume únicamente control de potencia en lazo cerrado, lo que puede dar lugar a resultados poco precisos. En los escasos casos en los que se modela el control de potencia en lazo cerrado, el análisis requiere una mayor complejidad de simulación, a fin de modelar la convergencia de este método, por tanto limitando su aplicabilidad para estudios que incluyan fenómenos que tienen lugar en escalas temporales mayores, tales como los traspasos.

En este trabajo se propone un modelo analítico que permite modelar el control de potencia en lazo cerrado del enlace ascendente en sistemas basados en OFDMA, para su posterior aplicación en simulación, tanto estática como dinámica, a nivel de sistema. El modelo propuesto da lugar a un problema de optimización que tiene como objetivo minimizar la potencia total de transmisión del sistema, asegurando, a la vez, que las conexiones alcanzan un nivel determinado de *Signal to Interference plus Noise Ratio* (SINR). En este sentido, a diferencia de los enfoques existentes, la solución que se presenta proporciona el nivel de potencia que se obtendría aplicando el control de potencia en lazo cerrado, sin necesidad de realizar varias iteraciones para que el sistema converja. En concreto, la formulación propuesta da lugar a un problema de optimización lineal, que se puede resolver con multitud de herramientas. La validez del modelo se ha evaluado comparando los resultados que proporciona con aquellos que se obtendrían mediante una implementación iterativa. Posteriormente se ha usado el modelo para analizar diferentes estrategias de selección de acceso en redes heterogéneas, así como su impacto sobre los niveles de potencia necesarios.

El resto del documento se estructura como sigue. En la Sección II se presenta un análisis de la literatura relacionada existente. A continuación, el modelado del sistema se describe en la Sección III, en la que se presenta, además, el problema de optimización resultante. A continuación, en la Sección IV se evalúa el modelo propuesto, y se analiza el rendimiento, en términos de potencia, de diferentes técnicas de selección de acceso. Finalmente, el artículo concluye en la Sección V, donde se resumen las contribuciones y se enumeran líneas futuras de investigación.

II. TRABAJOS PREVIOS

A pesar de la creciente importancia de la gestión de la potencia del enlace ascendente en redes celulares, no hay mucha literatura reciente relacionada con este aspecto. Algunos trabajos previos se centraron en analizar las diferencias entre las soluciones de control de potencia

en lazo abierto y cerrado en redes LTE [4], [5]. Más recientemente, los autores de [6] han comparado ambos esquemas de control de potencia, concluyendo que la técnica de lazo cerrado tiene un mejor rendimiento, y que los niveles de potencia obtenidos en lazo abierto no son siempre apropiados. Sin embargo, muchos de los estudios existentes se centran en analizar las técnicas en lazo abierto [7], buscando optimizar sus parámetros de configuración [8], [9], [10].

En lo que se refiere al modelado del control de potencia del enlace ascendente, algunos estudios previos han abordado el análisis estático a nivel de sistema, o planificación de red. Por ejemplo, en [11] se presenta un modelo general, mientras que los autores de [12] proponen uno específico para sistemas basados en WCDMA. También se han presentado modelos para redes heterogéneas basadas en OFDMA, tales como el descrito en [13], donde se considera el impacto de la interferencia entre celdas para obtener el rendimiento de la red. Por otro lado, los autores de [14] hacen uso de técnicas de geometría estocástica para definir un marco matemático para el análisis a nivel de sistema que ayude en el diseño de redes. De forma similar, en [15] se analiza el impacto de las topologías heterogéneas sobre el enlace ascendente, prestando especial atención a la interferencia entre elementos de acceso de diferentes capas. En relación con la selección de acceso, en [7] se analizan diferentes configuraciones del control de potencia del enlace ascendente, usando técnicas basadas en *Reference Signal Received Power* (RSRP) y CRE. Sin embargo, la mayoría de los trabajos existentes asumen políticas de acceso sencillas, como la distancia entre estación base y usuario [16].

Como se puede observar, la mayoría de los modelos propuestos asumen notables simplificaciones del sistema [16], lo que puede llevar a resultados poco precisos. Por otro lado, el uso de modelos más realistas requiere un tiempo de simulación que podría resultar excesivo [4].

Como respuesta a esta problemática, el modelo propuesto en este trabajo tiene como objetivo proporcionar el mismo nivel de precisión que la simulación intensiva, sin necesitar el proceso iterativo para que la técnica de control de potencia converja. A continuación se resumen las principales contribuciones:

- Definición de un modelo analítico del control de potencia en lazo cerrado para sistemas basados en OFDMA. Cabe mencionar que no se trata de una propuesta de control de potencia, sino que tiene como objetivo emular el comportamiento del sistema real.
- El modelo se ha diseñado para ser usado en simulación a nivel de sistema, tanto estática como dinámica. El objetivo es proporcionar resultados similares a los obtenidos mediante la simulación del control de potencia en lazo cerrado, evitando la sobrecarga de las iteraciones necesarias para que el problema converja.
- En el modelo se considera el impacto de la interferencia mutua entre usuarios, aspecto que normalmente es ignorado. Dado lo genérico de la solución propuesta,

el nivel de interferencia se puede modular para tener en cuenta, de forma estadística, técnicas que mitiguen dicha interferencia.

- El planteamiento del modelo da lugar a un problema de optimización lineal, que puede ser resuelto con un gran número de herramientas y puede, por lo tanto, ser fácilmente integrado en entornos de simulación.

III. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

En esta sección se describen los esquemas de control de potencia tradicionales de LTE. Tomando como base estas definiciones, posteriormente se presenta el modelo analítico para la configuración en lazo cerrado.

A. Esquemas de control de potencia del enlace ascendente

Se puede definir la potencia a transmitir, en lazo cerrado, por un UE como sigue [17]:

$$P = \min\{P_{\max}, P_0 \cdot N_{RB} \cdot \gamma^\alpha \cdot \delta_{\text{mcs}} \cdot f(\Delta)\} \quad (1)$$

donde P_{\max} es la potencia máxima que puede transmitir el UE, P_0 es un parámetro que refleja el nivel de interferencia esperado, N_{RB} es el número de recursos asignados al usuario, y los parámetros γ y α se corresponden, respectivamente, con las pérdidas de propagación y el factor de corrección de dichas pérdidas. El parámetro δ_{mcs} indica un nivel de potencia adicional que depende del *Modulation and Coding Scheme* (MCS) y que es específico para cada UE. Finalmente, $f(\Delta)$ es la función de corrección de lazo cerrado, que permite realizar ajustes de potencia de acuerdo a las variaciones del canal.

Tanto el parámetro P_0 como α se envían desde la red a los usuarios, mientras que la estimación de las pérdidas por propagación las obtiene el UE usando el nivel de RSRP. A partir de estos tres parámetros, que configuran el control de potencia en lazo abierto, el usuario puede establecer el nivel de potencia sin indicaciones adicionales desde la red, siendo incluso capaz de compensar variaciones lentas del canal.

Posteriormente, la estación base indica, mediante el parámetro $f(\Delta)$, sucesivos ajustes del nivel de potencia (lazo cerrado), de modo que el valor usado se desvíe del obtenido mediante los parámetros en lazo abierto para compensar las variaciones del canal. Se puede encontrar una explicación más detallada de los procedimientos de control de potencia en [18].

B. Modelo del sistema

Se considera un escenario compuesto por un conjunto de usuario y celdas LTE, respectivamente \mathcal{U} y \mathcal{B} , y se asume que todas las celdas comparten los mismos recursos espectrales, que se modelan como bloques asignables o *physical resource block* (PRB); los cuales son la unidad básica de asignación de recursos LTE. Por lo tanto, las conexiones de todos los usuarios se ven interferidas por las del resto, excepto por aquellos conectados a la misma celda. Finalmente, se asume que la selección de acceso ya ha tenido lugar, por lo que se conocen las conexiones

de los usuarios. Cabe indicar que no se hace ninguna suposición sobre la técnica concreta de selección acceso.

La celda que da servicio (conectividad) a un usuario i se define como $\beta(i) \in \mathcal{B}$, mientras $\mathcal{U}(k) \subseteq \mathcal{U}$ es el subconjunto de usuarios conectados a la celda k , y C_k la capacidad de dicha celda, en número de PRBs. Por otro lado, γ_{ik} indica las pérdidas de propagación entre el usuario i y la celda k , mientras que, de forma particular, Γ_i se corresponde con las pérdidas con respecto a la celda a la que se conecta el usuario, $\Gamma_i = \gamma_{i,\beta(i)}$. El resto de los parámetros tienen el mismo significado que el indicado anteriormente.

A partir de estos parámetros se define la interferencia por PRB experimentada por la conexión del usuario i , en su celda, I_i , como sigue:

$$I_i = \sum_{k \in \mathcal{B}/\beta(i)} \sum_{j \in \mathcal{U}(k)} N_{RB_j} P_0 \delta_{\text{mcs}_i} \frac{\gamma_{jk}^\alpha}{\gamma_{j\beta(i)}} f(\Delta)_i S(i, j, C_k, C_{\beta(i)}) \quad (2)$$

donde N_{RB_j} es la cantidad de recursos utilizados por el usuario interferente j . Además, se ha introducido el parámetro $S(i, j, C_k, C_{\beta(i)})$ para modelar, de forma estadística o determinista, la interferencia debida a otros usuarios como una función que dependería del *scheduling* y técnicas de reducción de interferencia. Por ejemplo, si se usara una política de *scheduling* concreta y determinista únicamente aquellos usuarios que transmiten en los mismos PRBs generarían interferencia. Por otro lado, dado que el objetivo de este trabajo es introducir el modelo, este parámetro se modela de forma simplificada asumiendo que no hay coordinación entre celdas y que el *scheduler* es aleatorio, de modo que $S(i, j, C_k, C_{\beta(i)}) = 1/C_k$.

Como se puede observar, la interferencia se define como la suma normalizada de los recursos asignados a otros usuarios, $j \in \mathcal{U}(k)$, $k \in \mathcal{B}/\beta(i)$, ponderada por el nivel de potencia interferente de dichos usuarios en la celda con la que se conecta el usuario i , $\beta(i)$

Entonces, la potencia transmitida por el usuario i , P_i , se puede definir en términos del nivel de SINR objetivo, St_i , y la interferencia correspondiente, de modo que $St_i \leq \frac{P_i/\Gamma_i}{\sigma^2 + I_i}$, donde $P_i = P_0 \Gamma_i^\alpha \delta_{\text{mcs}_i} f(\Delta)_i$. Si se agrupan todos los términos dependientes, se puede expresar la SINR de un usuario como una combinación lineal de la potencia transmitida por otros usuarios;

$$P_i - St_i \sum_{k \in \mathcal{B}/\beta(i)} \sum_{j \in \mathcal{U}(k)} \frac{N_{RB_j} P_j \Gamma_i}{C_k \gamma_{j\beta(i)}} \geq St_i \Gamma_i \sigma^2 \quad (3)$$

Si se asume que cada UE transmitirá con la mínima potencia requerida para satisfacer su SINR objetivo, la configuración de potencia del enlace ascendente, en lazo cerrado, de todos los usuarios se puede modelar como un problema de optimización lineal, tal como se muestra a continuación:

Problem 1 (Asignación de potencia).

$$\min \sum_{i \in \mathcal{U}} P_i \quad (4)$$

$$\text{s.t. } P_i - S_{t_i} \sum_{k \in \mathcal{B}/\beta(i)} \sum_{j \in \mathcal{U}(k)} \frac{N_{RB_j} P_j \Gamma_i}{C_k \gamma_{j\beta(i)}} \geq S_{t_i} \Gamma_i \sigma^2 \quad \forall i \in \mathcal{U} \quad (5)$$

$$P_i \geq 0 \quad \forall i \in \mathcal{U} \quad (6)$$

Como se puede observar, la interferencia mutua que se considera en el Problema 1 proporciona, en una única evaluación, el nivel de potencia que se obtendría una vez que el proceso de lazo cerrado converge. Además, cabe destacar que el resultado del problema, P_i , incluye tanto los parámetros de lazo abierto como cerrado, por lo que los valores de estos dependerán de la configuración concreta. Por ejemplo, si se asumen valores fijos de P_0 y α , los parámetros en lazo cerrado (δ_{mcs_i} y $f(\Delta)_i$) se despejarían, usando la expresión $P_i = P_0 \Gamma_i^\alpha \delta_{mcs_i} f(\Delta)_i$.

Aunque no se incluyen en el modelo los desvanecimientos rápidos (*fast fading*), parece razonable asumir que su contribución se anularía (media cero) en el tiempo de convergencia del mecanismo de lazo cerrado. Por otro lado, aunque en el planteamiento del modelo se ha asumido que todas las celdas comparten los mismos recursos frecuenciales (escenario mono-portadora), el modelo se puede extender a escenarios multi-portadora, en la que los recursos asignados en diferentes bandas frecuenciales no interferirían. Por ejemplo, en un escenario con diferentes portadoras para las capas de estaciones macro y *small* no se consideraría la interferencia entre capas.

IV. VALIDACIÓN DEL MODELO Y ANÁLISIS DE ESCENARIOS

El modelo propuesto se ha validado en un escenario LTE con dos capas de celdas, macro y *small*. El primer nivel está compuesta por 7 estaciones base, con 3 sectores cada una, desplegadas según un patrón hexagonal. Por su parte, la segunda capa la conforman un número variable de *small-cells*, desplegadas de manera aleatoria dentro del área de cobertura de las estaciones base macro. Se considera que todos los elementos de acceso comparten una banda de 20 MHz (100 PRBs) y que no existe cooperación entre ellos. Sobre este escenario se despliegan 100 usuarios, que se consideran siempre activos y, por lo tanto, continuamente transmitiendo. En la Tabla I se resumen los parámetros principales del escenario.

Dado que el objetivo principal de este trabajo es validar el modelo propuesto, los resultados presentados en esta sección se han obtenido mediante simulación estática a nivel de sistema; sin embargo, cabe destacar que el modelo puede ser igualmente aplicable a simulación dinámica, en la que existan patrones de movilidad y tráfico. En cada iteración los usuarios y *small-cells* se despliegan aleatoriamente y el nivel de potencia recibido en las estaciones base se calcula para cada usuario. En función de dichos niveles, así como de otros parámetros, se lleva a cabo la selección de acceso y, a continuación, se aplica

Tabla I: Características del escenario

Escenario LTE	20MHz @2.1GHz
Capa macro	Inter Site Distance (ISD) 500 m, 7 celdas con 3 sectores Max. potencia transmisión 46 dBm Ganancia de antena 14 dBi, 15° down-tilt NF 3 dB
Capa <i>small</i>	Despliegue aleatorio Max. TX. power 30 dBm Antena-omni, 5.0 dBi NF 3 dB
Path Loss (Tables B.1.2.1-1 and B.1.2.1-2 from [19])	Macro-BS ↔ UE: <i>Urban macro</i> (UMA) Small-BS ↔ UE: <i>Urban micro</i> (UMi)
UE	Max. potencia transmisión 24 dBm (250 mW) Ganancia de antena 0 dB
PUSCH <i>Maximum Allowable Path Loss</i> (MAPL)	140 dB
δ_{mcs}	0 dB, i.e. independiente del MCS
α	1, i.e. compensación total

el mecanismo de control de potencia para establecer los niveles de potencia de transmisión de cada usuario. En los casos en que se utiliza el modelo propuesto, el problema de optimización se resuelve con la librería GLK¹. En cuanto a la selección de acceso, se han estudiado las siguientes:

- Selección de acceso clásica basada en RSRP: cada usuario se conecta a la celda de la que recibe el mayor nivel de potencia. Mientras que esta técnica presenta un buen comportamiento en redes homogéneas, no es capaz de explotar la capacidad adicional de las *small-cells* debido a que no tiene en cuenta las diferentes potencias de transmisión de los diferentes tipos de estaciones base.
- *cell-range extension* (CRE): a fin de subsanar las limitaciones de la estrategia anterior, en este caso se añade un factor de *bias* a la potencia recibida desde las estaciones base en función de su tipo. De esta forma se incrementa de forma virtual el área de cobertura de las celdas con menor potencia de transmisión, favoreciendo que los usuarios se conecten a ellas.
- *Downlink Uplink Decoupling*: mientras que las técnicas anteriores se centran en las comunicaciones del enlace descendente, esta última trata de optimizar, en términos de potencia, ambos sentidos de la comunicación de manera individual. De este modo, los usuarios se conectan para el enlace descendente de acuerdo al nivel de RSRP y la conexión del enlace ascendente se realiza con la celda con la que haya menores pérdidas de propagación.

A. Validación del modelo

El primer objetivo de la validación es comprobar que el comportamiento del modelo propuesto es semejante al que se obtendría implementado el control en lazo cerrado

¹<https://www.gnu.org/software/glpk/>

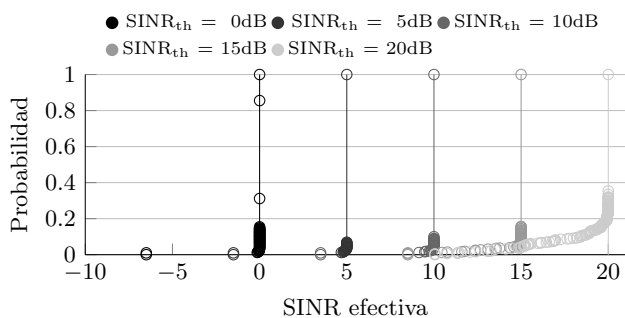


Fig. 1: *cdf* de la SINR efectiva usando el modelo propuesto (líneas continuas) y lazo cerrado iterativo (marcadores)

de manera iterativa. Por simplicidad, este primer análisis se ha llevado a cabo sobre un escenario homogéneo, compuesto únicamente por estaciones base macro. Para la implementación iterativa se ha seguido el enfoque descrito en [4], donde en primer lugar se obtiene el componente en lazo abierto para establecer el nivel de potencia inicial. A continuación se calcula la SINR efectiva de las conexiones, y se ajusta la potencia en cada usuario hasta que se alcance el nivel de SINR requerido; este proceso se repite hasta que la potencia de todos los usuarios se estabiliza (el sistema converge). Por otro lado, el modelo propuesto se aplica en una escala de tiempo superior, de forma que se usen realizaciones independientes del escenario para cada instancia del problema. A fin de realizar una comparativa justa entre ambos procesos no se han incluido desvanecimientos, por lo que las diferencias se deben sólo a la interferencia mutua entre usuarios.

La Figura 1 muestra la *cumulative distribution function* (CDF) de la SINR efectiva obtenida para diferentes valores de SINR objetivo de los usuarios. Como se puede observar, la solución propuesta siempre proporciona el valor deseado, como consecuencia de incluir la interferencia mutua en su definición. Por otro lado, la implementación iterativa presenta una distribución ligeramente más dispersa, debido a las iteraciones necesarias para alcanzar la convergencia del sistema. En concreto se puede apreciar que a medida que el requisito de SINR es más exigente, la distribución presenta más valores por debajo del objetivo, lo cual indica un mayor tiempo de convergencia.

De manera similar, en la Figura 2 se muestra la distribución de la potencia de transmisión cuando se usan ambas implementaciones del control de potencia en lazo cerrado; de nuevo los resultados se han obtenido para varios valores de SINR objetivo. De acuerdo a los resultados se puede concluir que ambas soluciones presentan comportamientos similares, apareciendo diferencias notables sólo para valores de SINR objetivo muy altos (20 dB).

En general, se puede concluir que el modelo propuesto presenta un comportamiento similar a la implementación iterativa, sin la complejidad añadida al tiempo de convergencia. En concreto, para los escenarios analizados, se ha observado que la implementación iterativa requiere entre 4 y 12 ciclos para converger. Además, cabe destacar que los

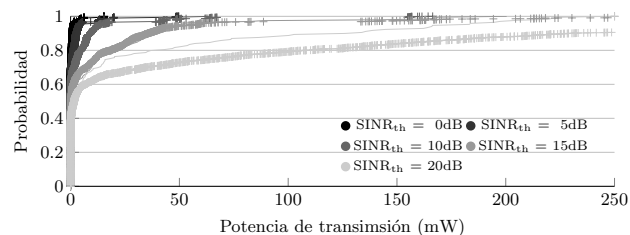


Fig. 2: *cdf* de la potencia de transmisión usando el modelo propuesto (líneas continuas) y lazo cerrado iterativo (marcadores)

tiempos de convergencia tienen una gran dependencia de la geometría de la red y densidad de usuarios, por lo que el número de iteraciones se incrementaría en escenarios más complejos. Por otro lado, el modelo propuesto obtiene los niveles de potencia en una sola iteración, equivalente a una instancia del problema, por lo que reduce la complejidad de la simulación. El análisis en profundidad de la reducción de complejidad se abordará en trabajos futuros, una vez que el modelo ha sido validado.

B. Análisis de selección de acceso

Tras evaluar el rendimiento del modelo, se pretende analizar las diferencias en niveles de potencia obtenidas mediante los esquemas de lazo abierto y cerrado cuando se aplican diferentes técnicas de selección de acceso. Para obtener los siguientes resultados se ha utilizado el modelo propuesto para el esquema de lazo cerrado, por lo que ambos esquemas de control de potencia tienen la misma complejidad de simulación. A diferencia del análisis anterior, en este caso se despliega un escenario heterogéneo compuesto tanto por estaciones macro como *small-cells*, de acuerdo a los parámetros descritos en la Tabla I. Además, la comparativa se ha realizado usando diferentes técnicas de selección de acceso para analizar las interacciones del control de potencia y dichas estrategias. En concreto, se compara la selección tradicional basada en RSRP con dos configuraciones de CRE, usando niveles de *bias* de 3 y 9 dB, y con DUE. Todos los resultados se han obtenido para valores de SINR objetivo de 5 dB, aunque se observaron resultados similares con otros valores.

En la Figura 3 se muestra la distribución de la SINR, para diferentes densidades de *small-cells*, cuando se aplica el esquema en lazo abierto. Los resultados en lazo cerrado no se muestran porque, como se mostró en la Figura 1, usando el modelo propuesto siempre se obtiene el nivel de SINR requerido. Como se puede apreciar, los resultados indican que el esquema en lazo cerrado no asegura la calidad de servicio requerida, sino que presenta una distribución bastante dispersa, que depende tanto de la densidad de *small-cells* como de la técnica de selección de acceso. En concreto se puede apreciar que las selecciones de acceso RSRP y CRE₃ muestran las distribuciones más dispersas.

Finalmente se comparan los niveles de potencia, por PRB, tanto para el esquema en lazo abierto como cerrado. Aunque ambas configuraciones presentan diferentes

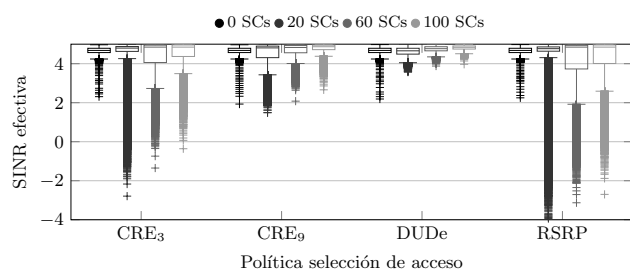
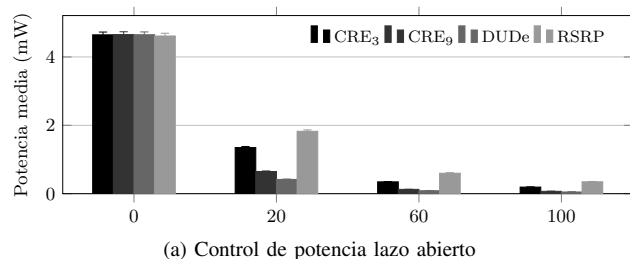
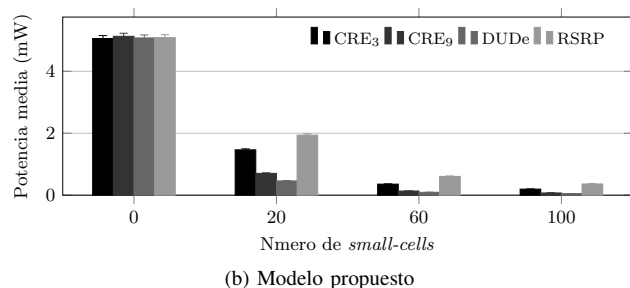


Fig. 3: Distribución de la SINR efectiva usando el esquema en lazo abierto



(a) Control de potencia lazo abierto



(b) Modelo propuesto

Fig. 4: Potencia requerida por PRB para diferentes configuraciones de selección de acceso y densidad de *small-cells*

comportamientos en términos de SINR efectiva, la Figura 4 evidencia que la potencia requerida es similar en ambos casos. Esto es consecuencia de que el esquema en lazo cerrado optimiza el reparto de potencia para reducir los niveles de interferencia. Cabe destacar que esta optimización tendría lugar tanto con el modelo propuesto como con la implementación iterativa.

V. CONCLUSIONES

Las comunicaciones en enlace ascendente en redes celulares no han recibido mucha atención desde la comunidad científica. Sin embargo, su importancia está aumentando notablemente, como consecuencia de la aparición de nuevos servicios y topologías, lo que pone de manifiesto la necesidad de mecanismos que permitan mejorar la gestión de sus recursos. A su vez, la evaluación de las diferentes soluciones precisan de herramientas y modelos de simulación capaces de tener en cuenta la complejidad de los nuevos despliegues y topologías de red.

En este trabajo se ha propuesto un modelo analítico para el control de potencia en lazo cerrado del enlace ascendente, que permite reducir la complejidad de simulación de manera notable con respecto a los enfoques tradicionales. Este modelo se ha validado comparando

su comportamiento con las técnicas de modelado tradicionales, que están basadas en implementaciones iterativas, y requieren por tanto un mayor tiempo de simulación. Los resultados han puesto de manifiesto que el modelo propuesto proporciona resultados similares a las técnicas tradicionales, reduciendo la complejidad del análisis de forma significativa.

Además, aprovechando la funcionalidad del modelo, se ha analizado la interacción entre la políticas de selección de acceso y esquemas de control de potencia, tanto en lazo abierto como cerrado. Los resultados muestran que ambos aspectos están estrechamente relacionados, con una fuerte dependencia de la geometría de la red.

En trabajos futuros se seguirá haciendo uso del modelo propuesto para acometer el análisis de sistema de redes densas. En concreto, nos centraremos en escenarios con un gran número de dispositivos de usuario, que serán más relevantes en despliegues futuros. Por otro lado, se llevará a cabo un análisis en detalle de la reducción de la complejidad de simulación que permite el modelo. También se pretende extender su definición para considerar técnicas de *scheduling* y cooperación entre celdas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación del Gobierno de España (Ministerio de Economía y Competitividad, Fondo Europeo de Desarrollo Regional, FEDER) de este trabajo a través de los proyectos ADVICE: *Dynamic provisioning of connectivity in high density 5G wireless scenarios* (TEC2015-71329-C2-1-R) y FIERCE: *Future Internet Enabled Resilient Cities* (RTI2018-093475-A-100).

REFERENCIAS

- [1] V. Frascolla, F. Miatton, G. K. Tran, K. Takinami, A. D. Domenico, E. C. Strinati, K. Koslowski, T. Haustein, K. Sakaguchi, S. Barbarossa, and S. Barbaris, "5G-MiEdge: Design, standardization and deployment of 5G phase II technologies: MEC and mmWaves joint development for Tokyo 2020 Olympic games," in *2017 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, Sep. 2017, pp. 54–59.
- [2] M. Weichold, M. Hamdi, M. Z. Shakir, M. Abdallah, G. K. Karagiannidis, and M. Ismail, *Cognitive Radio Oriented Wireless Networks: 10th International Conference, CROWNCOM 2015, Doha, Qatar, April 21-23, 2015, Revised Selected Papers*, 1st ed. Springer Publishing Company, Incorporated, 2015.
- [3] X. Chu, D. Lopez-Perez, Y. Yang, and F. Gunnarsson, *Heterogeneous Cellular Networks: Theory, Simulation and Deployment*. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [4] A. Simonsson and A. Furuskär, "Uplink Power Control in LTE - Overview and Performance. Principles and Benefits of Utilizing rather than Compensating for SINR Variations," in *2008 IEEE 68th Vehicular Technology Conference*, Sept 2008, pp. 1–5.
- [5] Y. Wang and S. Venkatraman, "Uplink power control in LTE heterogeneous networks," in *2012 IEEE Globecom Workshops*, Dec 2012, pp. 592–597.
- [6] J. Turkka, Olivia, M. D. Villaluz, and S. Foo, "Optimization of LTE uplink performance in multivendor heterogeneous networks," in *2018 International Conference on Information Networking (ICOIN)*, Jan 2018, pp. 374–379.
- [7] K. Safjan, S. Strzyż, K. I. Pedersen, J. Steiner, and C. Rosa, "Automatic methods for HetNet uplink power control optimization under fractional load," in *2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Sept 2013, pp. 3056–3060.
- [8] A. Haider, S.-H. Lee, S.-H. Hwang, D. I. Kim, and J. H. Na, "Uplink open loop power control for LTE HetNet," in *2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC)*, Aug 2016, pp. 83–85.

- [9] K. Safjan, S. Strzyż, K. I. Pedersen, J. Steiner, and C. Rosa, "Open Loop Power Control parameter settings impact on LTE HetNet uplink performance," in *2013 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*, June 2013, pp. 1134–1138.
- [10] H. Martikainen, I. Viering, and B. Wegmann, "Dynamic range aware LTE uplink P0 optimization in HetNet," in *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, May 2016, pp. 1–6.
- [11] K. L. Clarkson, K. G. Hampel, and J. D. Hobby, "Modeling UpLink Power Control with Outage Probabilities," in *2007 IEEE 66th Vehicular Technology Conference*, Sep. 2007, pp. 799–803.
- [12] R. Patachaianand and K. Sandrasegaran, "System-Level Modeling and Simulation of Uplink WCDMA," in *Fifth International Conference on Information Technology: New Generations (itng 2008)*, April 2008, pp. 1071–1076.
- [13] H. Tabassum, F. Yilmaz, Z. Dawy, and M. Alouini, "A Statistical Model of Uplink Inter-Cell Interference with Slow and Fast Power Control Mechanisms," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 61, no. 9, pp. 3953–3966, Sep. 2013.
- [14] M. Di Renzo and P. Guan, "Stochastic Geometry Modeling and System-Level Analysis of Uplink Heterogeneous Cellular Networks With Multi-Antenna Base Stations," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 64, no. 6, pp. 2453–2476, June 2016.
- [15] F. Wang and W. Wang, "Analytical modeling of uplink power control in two-tier femtocell networks," in *2015 Wireless Telecommunications Symposium (WTS)*, April 2015, pp. 1–6.
- [16] S. Essassi, M. Siala, R. Hamila, M. O. Hasna, and S. Cherif, "Power control and RB allocation for LTE uplink," in *2016 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, Sept 2016, pp. 417–421.
- [17] S. Berger, B. Almeroth, V. Suryaprakash, P. Zanier, I. Viering, and G. Fettweis, "Dynamic Range-Aware Uplink Transmit Power Control in LTE Networks: Establishing an Operational Range for LTE's Open-Loop Transmit Power Control Parameters (α, P_0)," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 3, no. 5, pp. 521–524, Oct. 2014.
- [18] B. Muhammad and A. Mohammed, "Uplink closed loop power control for LTE system," in *2010 6th International Conference on Emerging Technologies (ICET)*, Oct. 2010, pp. 88–93.
- [19] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), "Technical Specification Group Radio Access Network; Further Advancements for E-UTRA," 2017. [Online]. Available: <http://www.3gpp.org/dynareport/36814.htm>