

Simulación genérica a nivel de sistema para soluciones avanzadas de gestión de recursos

Paula Rodríguez, Paula Sarasúa, Luis Diez, Ramón Agüero

Departamento de Ingeniería de Comunicaciones

Universidad de Cantabria

Plaza de la Ciencia, s/n. 39005 Santander

{paula.rodriguez, paula.sarasua}@alumnos.unican.es, {ldiez, ramon}@tlmat.unican.es

Resumen—A pesar del notable esfuerzo llevado a cabo por la comunidad científica en el ámbito de la tecnología LTE, aún no existe una metodología globalmente aceptada para analizar este tipo de redes. Igualmente, no se conoce una única solución que responda a todos los requisitos que se pueden plantear a la hora de acometer su análisis, de modo que se emplean diferentes herramientas y soluciones, cada una con sus ventajas e inconvenientes. Una de las limitaciones más importantes es la dificultad para evaluar escenarios con un número elevado de elementos de red, lo que podría reflejar la situación de redes heterogéneas (HetNets). En otros casos, no se presta mucha atención a las características del nivel de servicio, suponiendo habitualmente que el sistema está saturado (*full-buffer*). Este trabajo presenta un entorno de simulación flexible y genérico (GWNSyM - *Generic Wireless Network System Modeler*), que permite el despliegue de escenarios complejos, y el análisis de diferentes técnicas y soluciones de gestión, así como nuevas arquitecturas de red. La herramienta se valida analizando una red muy heterogénea, con un elevado número de usuarios. Sobre este escenario se han analizado diferentes técnicas de acceso, incluyendo DUDe (Downlink-Uplink Decoupling), que plantea un cambio sustancial frente a las soluciones tradicionales de selección de acceso.

Palabras Clave—Network Modeling, Simulation, LTE/LTE-A, DUDe

I. INTRODUCCIÓN

De acuerdo a las previsiones actuales [1], la demanda de tráfico en redes móviles inalámbricas se incrementará de forma notable en los próximos años. Esto es debido, entre otras razones, a la consolidación de servicios de gran capacidad, tales como el *streaming* de vídeo o los juegos *online*, que compartirán los recursos de las redes con otros más tradicionales, como la navegación *web* o las descargas de ficheros.

Aunque a día de hoy las tecnologías 4G no están totalmente consolidadas, la comunidad investigadora ya está dirigiendo sus esfuerzos a la definición de las bases de la 5G, que daría soporte a la previsible heterogeneidad de servicios. Así, se prevé que en el futuro coexistan redes de diferentes tecnologías, y que la cooperación

entre ellas se lleve a cabo de manera natural. Por ejemplo, se espera que las estrategias de densificación mediante *small-cells* jueguen un papel muy importante en los próximos años [2], ya que pueden proporcionar un importante aumento de la capacidad. Otras técnicas que se han incluido recientemente en las especificaciones del 3GPP son las referidas a la cooperación entre elementos de red, o técnicas Cooperative Multi-Point (CoMP), o el desacoplamiento de los enlaces ascendente y descendente de las conexiones [3], o Downlink-Uplink Decoupling (DUDe).

Además de las soluciones que se sitúan en las capas inferiores de las redes celulares (gestión de recursos), en las capas superiores las técnicas de virtualización [4], Network Function Virtualization (NFV) y Software Defined Networks (SDN), se presentan como elementos clave de los despliegues de red en los próximos años [5].

A pesar de los claros avances que proporcionan estas soluciones, también originan nuevas problemáticas, que requieren un estudio y análisis apropiados. Para ello, la comunidad investigadora se centra habitualmente en escenarios específicos y casos de uso concretos, extraídos del amplio abanico de posibilidades que aparecen a raíz de los nuevos conceptos de red.

Uno de los primeros problemas a la hora de comenzar un análisis concreto es la elección de la herramienta, o conjunto de herramientas, que pueden ser usadas a fin de llevar a cabo un estudio adecuado, en función del nivel de abstracción requerido. Las plataformas de simulación juegan un papel fundamental, debido a su versatilidad y coste. En este sentido, existen básicamente tres alternativas principales: (1) simuladores a nivel de enlace, (2) a nivel de sistema, o (3) simuladores de red, que permiten acometer análisis más detallados. La primera opción se centra habitualmente en el último salto (inalámbrico) de la comunicación, y facilita la evaluación de técnicas de enlace, como la estimación de canal, técnicas Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) o soluciones relacionadas

con el Adaptive Modulation and Coding (AMC). Dentro de este grupo *Vienna LTE Simulator* [6] destaca como una de las soluciones mayoritariamente adoptadas. La segunda alternativa permite una mayor flexibilidad, aunque como contrapartida suele requerir alguna simplificación, con la consiguiente pérdida de precisión. La mayoría de los simuladores a nivel de sistema se basan en desarrollos propietarios (normalmente basados en MATLAB), aunque en algunos casos se usan algunas de las pocas herramientas específicas disponibles, donde nuevamente destaca el simulador LTE Vienna [6]. Finalmente, en el tercer grupo existen varias plataformas, aunque la que seguramente está recibiendo más atención últimamente es *ns-3* [7], y su extensión LTE-EPC Network Simulator (LENA) [8], que se encuentra en constante evolución. En el caso de simuladores de red, la mayor limitación son los tiempos para realizar los análisis, que se debe al alto grado de detalle de su implementación y modelos.

La Tabla I proporciona una comparativa detallada de las tres alternativas identificadas, en base a algunas de sus principales características. Una de las limitaciones que comparten las soluciones existentes es la dificultad para incluir o modelar nuevas técnicas y modelos de red, ya que su implementación suele ser bastante rígida, habitualmente centrada en escenarios concretos.

En base a las características de las soluciones de simulación existentes, surge la cuestión recurrente de qué herramienta se debería usar, de acuerdo al escenario y topología de red de interés, ya que no existe una solución que sea la idónea para todos los casos. El simulador *Vienna LTE* [6] está implementado en Matlab, y se centra en las capas inferiores, por lo que normalmente no es capaz de reflejar de manera apropiada diferentes patrones de servicio, adoptando habitualmente modelos de saturación o *full-buffer*. Por otro lado, los tiempos de simulación son bastante elevados, de modo que los análisis normalmente no cubren periodos de tiempo prolongados. Como consecuencia, en muchas ocasiones se opta por desarrollos propietarios, lo que requiere invertir un tiempo elevado en su desarrollo. Además, dado que se trata de soluciones ad-hoc, es complicado replicar los experimentos, así como integrarlos en otros entornos.

A fin de proporcionar una mejor respuesta, en este trabajo se presenta Generic Wireless Network System Modeler (GWNSyM), una plataforma flexible para la simulación de sistemas complejos. Esta herramienta se ha diseñado de modo genérico, para que sea fácilmente extensible con nuevas funcionalidades o soluciones de red. En este trabajo se presentan los principales aspectos tanto del diseño de la herramienta como de su implementación. Además, a modo de prueba de concepto, se presentará el análisis de diferentes técnicas de selección de acceso, haciendo uso de la herramienta.

El resto del artículo se estructura como sigue: en la Sección II se describe la funcionalidad básica de la herramienta, haciendo especial hincapié en los aspectos más relevantes de su implementación. A continuación, la Sección III presenta el escenario que se va a eva-

luar, los modelos implementados, así como los resultados obtenidos. Finalmente, la Sección IV enumera las principales conclusiones de este trabajo, así como las líneas futuras de investigación que surgen al aprovechar las posibilidades ofrecidas por la herramienta.

II. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

Como se ha comentado anteriormente, el objetivo principal de GWNSyM es el de proveer una serie de abstracciones que faciliten el modelado de redes para su posterior simulación. En lo que respecta a la metodología de análisis, se optó por una simulación basada en fotografías, o *snapshots*, del sistema, en contrapartida a otros modelos basados en eventos. De este modo, cada fotografía representa un instante discreto de tiempo, en el que se aplican los modelos implementados sobre los elementos de red pertinentes y en un orden establecido. Además, el estado resultante de una fotografía es usado para alimentar la siguiente, de modo que se puede capturar la memoria del sistema, lo que es especialmente importante para analizar la evolución de servicios.

El entorno de simulación GWNSyM ha sido implementado como un conjunto de librerías en C++, teniendo como uno de sus objetivos principales la re-utilización de código, que puede darse en dos sentidos: (1) código generado en el entorno GWNSyM se pueda re-usar en otros entornos, y (2) código existente pudiera integrarse dentro del simulador. Para el primer caso, se decidió no imponer restricciones de herencias a las clases C++ que implementan las diferentes entidades y modelos del simulador, sino que se estableció un mínimo interfaz que asegura la interacción de elementos GWNSyM. De forma resumida, por medio de técnicas de meta-programación se asegura que la compatibilidad entre los modelos implementados (por ejemplo, propagación o selección de acceso) y los elementos de red a los que se aplican, sin requerir ningún tipo de implementación (jerarquía, *namespaces*, etc.) específica, fomentando, de este modo, la separación de los modelos del sistema en el que se ejecutan. Del mismo modo, se ha añadido una funcionalidad de *wrapper*, que permite la integración de código existente dentro del entorno de simulación, dotándolo del interfaz requerido.

A continuación se explicará con más detalle los aspectos fundamentales de la simulación con GWNSyM, tanto en lo que se refiere a los elementos de simulación como al flujo de experimentación.

A. Elementos de simulación

Con el objetivo de no restringir el comportamiento de la herramienta de simulación a ninguna tecnología ni sistema en particular, se han definido dos elementos básicos que constituyen los escenarios de simulación GWNSyM: los *Tipos* representan elementos de red, mientras que las *Acciones* implementan modelos que se aplican sobre los *Tipos*.

Los *Tipos* definen la estructura de un elemento de red de forma general, junto con una configuración concreta. En este sentido, un elemento puede abarcar desde dispositivos

Tabla I: Análisis de características de alternativas de simulación para redes inalámbricas (LTE). Una clasificación subjetiva se otorga a los parámetros, de forma que en círculos rellanos significa bueno, mientras que los vacíos indican pobre rendimiento en ese parámetros

	Parámetro <i>Descripción de la característica de simulación que se necesita soportar</i>	Simulación a nivel de enlace <i>Modelado detallado de capas inferiores, lo que dificulta analizar escenarios con mas de un par fuente/destino</i>	Simulación a nivel de sistema <i>La mayoría de la literatura usa Matlab para realizar análisis. Vienna LTE Simulator es uno de los ejemplos más significativos</i>	Simulación de red <i>ns-3, junto con la extensión LENA es una de las alternativas más relevantes</i>
CARACTERÍSTICAS DEL ESCENARIO	<i>Complejidad del escenario: # de usuarios y estaciones base</i>	☐ Debido al gran nivel de detalle de estas herramientas, el número de elementos es bastante bajo, normalmente un elemento de acceso y un conjunto de usuarios[9]	☐ Se suelen asumir algunas simplificaciones, de modo que el número de elementos suele ser mayor	☐ El tiempo de simulación requerido para analizar escenarios grandes es normalmente inaceptable [10], posibles alternativas usando paralelización [11]
	<i>Dimensión temporal: tiempo que puede ser simulado y posibilidad de estudiar la evolución de servicios</i>	☐ Debido a la carga computacional [12], el tiempo simulado es bastante reducido, sin necesidad de mantener evolución de servicios	☐ El uso de entornos de desarrollo pesado (Matlab) normalmente impide tiempos largos de simulación	☐ Normalmente se considera la evolución de servicios, sin embargo, el tiempo de cómputo para simulaciones largas es muy elevado
	<i>Precisión: grado de precisión de los modelos usados</i>	● El modelado detallado de las capas inferiores es su principal objetivo, por lo que la precisión es muy alta	☐ Se asumen algunas simplificaciones aunque implementaciones disponibles siguen las especificaciones del 3GPP	☐ Aunque los modelos pueden ser simplificados, la implementación de los protocolos es bastante precisa
MARCO TECNOLÓGICO	<i>Cambio de arquitectura: posibilidad de añadir y soportar nuevos paradigmas de red: SDN and NFV</i>	☐ Como solución a nivel de enlace, no se consideran problemáticas de arquitectura	☐ Algunas de las posibilidades de las nuevas funcionalidades de red (tighter cooperation schemes) normalmente se pueden modelar	● Aunque la implementación puede ser costosa, la integración de nuevas opciones de arquitectura son normalmente posibles
	<i>Soporte de diferentes tecnologías y soluciones/técnicas</i>	☐ Se encuentran bastante limitadas a las funcionalidades iniciales. La integración de diferentes tecnologías es normalmente compleja	☐ Normalmente tienen flexibilidad para incorporar nuevas técnicas debido a las simplificaciones de capas inferiores	☐ Las plataformas de simulación de redes son bastante flexibles, y permiten la integración de diferentes tecnologías y técnicas nuevas
	<i>Modelado de servicios. Si se asume condiciones de saturación o carga constante</i>	☐ No se presta mucha atención al modelado de servicios, normalmente se centra en cómo los paquetes llegan a su destino en las capas inferiores	☐ Presentan caracterización básica de servicios, aunque normalmente se asume carga constante o <i>full-buffer</i> [13]	● Modelado de servicios relativamente avanzado. Permite incluso el uso de aplicaciones y servicios reales
OTROS ASPECTOS	<i>Propósito específico Vs. genérico y curva de aprendizaje</i>	☐ Como su ámbito de aplicación está bastante delimitado, la curva de aprendizaje es relativamente corta	☐ Aunque más específicos que los simuladores de red, no todos sus componentes son siempre de interés	☐ Normalmente son grandes entornos de propósito general, por lo que requiere bastante tiempo de aprendizaje antes de poder realizar análisis
	<i>Uso de metodologías complementarias. Técnicas de optimización</i>	☐ Normalmente se centran en analizar el rendimiento de una técnica concreta, y típicamente no buscan el rendimiento óptimo	☐ Aunque no está entre sus objetivos principales, las técnicas de optimización se pueden integrar	☐ La arquitectura del simulador ofrece una visión de conjunto, lo que permitiría aplicar estrategias de optimización global

de usuario a operadores, pasando por servicios o elementos virtuales. De acuerdo a su configuración, un *Tipo* puede agregar elementos de otro *Tipo*, de forma que se pueda definir la composición de cada elemento de red como una combinación de *Tipos*. La instanciación de elementos de un determinado *Tipo* define el conjunto de elementos correspondiente. A modo de ejemplo, la Figura 1 ilustra la creación de *Tipos* en GWNSyM para un caso genérico. Como se puede ver, el sustrato de los *Tipos* consiste en clases C++ que, junto a una configuración concreta, da lugar a un *Tipo*. Así, la Figura 1 muestra cómo una misma clase C++ C1 da lugar a dos *Tipos* (T1 y T2), en función de la configuración que se le aplica. Además, de acuerdo a la configuración, las instancias de cada *Tipo* pueden dar lugar a diferentes agregaciones.

Las *Acciones* representan un modelo particular que se va a aplicar a uno o más conjuntos de *Tipos*. En general, las *Acciones* representan comportamientos del sistema en sentido amplio, pudiendo abarcar desde fenómenos físicos tales como modelos de propagación a políticas concretas, como selección de acceso. Cada *Acción* toma como parámetros uno o más conjuntos de *Tipos*, y se ejecutan de forma secuencial en cada fotografía del escenario. Por otro

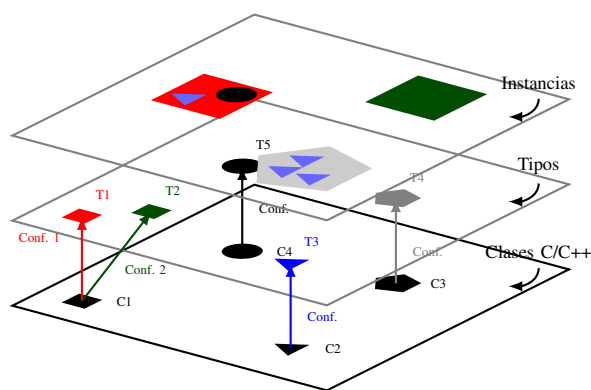


Fig. 1: Modelo de instanciación de GWNSyM

lado, hay ocasiones en las que una determinada *Acción* únicamente tiene sentido al inicio o final del experimento, como el despliegue de elementos estáticos, por ejemplo. Estos supuestos se han tenido en cuenta definiendo dos categorías de acciones, *Pre-Acción* y *Post-Acción*, que se ejecutan al principio y final del experimento, respectivamente.

B. Metodología de simulación

Una instancia de simulación, o experimento, representa el análisis de un escenario concreto, sujeto a una configuración específica. Cada experimento contiene dos bucles: uno exterior y otro interior. El primero realiza interacciones fotografía a fotografía, actualizando el estado de la red de acuerdo al resultado de la iteración (fotografía) anterior. Por su parte, el segundo bucle se encarga de aplicar los modelos correspondientes a los elementos de red dentro de una fotografía.

El Algoritmo 1 ilustra la metodología general. Como primer paso, se definen los *Tipos* y se crean sus instancias, dando lugar a los conjuntos previamente mencionados, de acuerdo a su configuración. Seguidamente, una vez que todos los elementos del sistema han sido instanciados, se ejecutan las acciones definidas como *Pre-Acciones*. Llegado este punto, se inicia el primer bucle, línea 13, que itera sobre cada fotografía y el bucle interior, línea 14, que se encarga de ejecutar las acciones de forma secuencial. Tras finalizar ambos bucles, se aplican las *Post-Acciones*, normalmente encargadas de extraer resultados y generar trazas.

Algoritmo 1 Flujo general de simulación

- 1: Definición de *Tipos*
 - 2: Configuración
 - 3: Instanciación y agregación
 - 4: $T \leftarrow \text{Conjuntos}$
 - 5: $A_{pre} \leftarrow \text{Pre-Acciones}$
 - 6: $A \leftarrow \text{Acciones}$
 - 7: $A_{post} \leftarrow \text{Post-Acciones}$
 - 8: $i = 0$
 - 9: $n \leftarrow \# \text{Fotografías}$
 - 10: **for** $b \in A_{pre}$ **do**
 - 11: Ejecutar pre-Acción $b(M_b \subseteq T)$
 - 12: **end for**
 - 13: **while** $i < n$ **do**
 - 14: **for** $a \in A$ **do**
 - 15: Ejecutar Acción $s(M_s \subseteq T)$
 - 16: **end for**
 - 17: **end while**
 - 18: **for** $e \in A_{post}$ **do**
 - 19: Ejecutar post-Acción $e(M_e \subseteq T)$
 - 20: **end for**
-

C. Ejemplo de definición de un escenario

A modo de ejemplo, la Figura 2 muestra los principales pasos de la definición de un escenario por medio de código. Como se puede observar en la Figura 2a, el primer paso consiste en el registro de tipos dentro del sistema. Los tipos consisten en dos objetos C++: el elemento de red y su configuración. Por ejemplo, el tipo *USER* se define en base a los objetos *User* y *UserConf*.

Antes de instanciar los elementos de cada tipo, el sistema comprueba aquellos que debe agregar, a través del nombre del tipo correspondiente. Como se muestra en la Figura 2a, la configuración del tipo *USER* indica que

```
gnsml::System system;
...
system.AddType<User, UserConf>("USER");
system.AddType<LteUe, LteUeConf>("LTE_UE", {Params});

system.AddType<LteCell, LteCellConf>("CELL", {Params});
system.AddType<LteEnb, LteEnbConf>("MACRO", {Params});
...
```

(a) Definición de *Tipos*

```
UserConf::ReadInnerConf(void) const
{
    return>{"LTE_UE", 1}; // read from configuration
}
```

(b) Agregación

```
system.PreAction<MacroDeploymenttr>>{"MACRO", {Params.}};
...
system.Action<LteScan>>{"USER", "MACRO", {Params.}};
...
system.PostAction<MacroLoad>>{"MACRO::*:CELL", {Params.}};
...
system.Run();
```

(c) Acciones

Fig. 2: Ejemplo de definición de escenario

agrega una instancia del tipo *LTE_UE*, de modo que se instancia un elemento del tipo *LTE_UE* por cada elemento del tipo *USER*.

Una vez establecidos los tipos, se registran las acciones que definen el comportamiento del sistema, tal y como se muestra en la Figura 2c. Es importante destacar que se ha dotado al entorno de simulación de un módulo que permite la búsqueda de los elementos instanciados, de forma que el paso de conjuntos de elementos a las acciones se lleva a cabo de una manera muy flexible. Por ejemplo, *MACRO::*:CELL* indicaría el conjunto de elementos *CELL* agregados en todas los elementos *MACRO*.

III. ESCENARIO Y EVALUACIÓN

A fin de validar el funcionamiento del entorno de simulación, esta sección presenta los principales resultados del estudio de diferentes técnicas de selección de acceso en un escenario LTE heterogéneo. En particular, se centra en la mejora en términos de potencia, y por tanto recursos, en el enlace ascendente, al aplicar diferentes políticas. Si bien la mayoría de los estudios se han centrado tradicionalmente en la gestión de recursos en el enlace descendente, la evolución de los servicios hace cada vez más necesario el prestar más atención a los recursos usados en la comunicación desde los usuarios a las estaciones base.

En las redes celulares un usuario se conecta habitualmente, tanto en el enlace ascendente como en el descendente, a aquella estación base de la que recibe una mejor calidad de la señal: en el caso concreto de redes LTE a la estación de la que recibe mayor *Reference Signal Received Power* (RSRP). Sin embargo, en entornos heterogéneos en los que co-existen estaciones base con un alto número de recursos y potencia de transmisión (*macro-cells*) con otras de capacidad más reducida (*small cells*), la selección de acceso basada en *RSRP* tiende a asociar a la mayor parte de usuarios con las que tienen una mayor potencia de transmisión, no permitiendo aprovechar el aumento de

capacidad que aportan las *small cells*. Además, dado que el parámetro *RSRP* únicamente tiene en cuenta la calidad del enlace descendente, la potencia necesaria para transmitir desde los usuarios a las estaciones podría estar lejos de ser óptimo. Se debe tener en cuenta que la potencia recibida de las *macro-cells* puede ser mucho mayor que la de las *small cells*, incluso si la primera está situada notablemente más lejos del usuario.

A fin de establecer políticas de selección de acceso que aprovechen de forma más eficiente los recursos de las redes heterogéneas, se propuso el uso de técnicas *Cell Range Extension* (CRE) [14], que se basan en incrementar sintéticamente la potencia de la señal de referencia de las *small-cells* en un valor fijado (o bias), favoreciendo así las asociaciones a estos elementos de acceso. Además, teniendo en cuenta el incremento de los recursos consumidos en el enlace ascendente como consecuencia de la aparición de nuevos servicios, surge la necesidad de realizar una gestión más óptima de los recursos en el enlace ascendente. En este sentido, se ha propuesto recientemente una estrategia de selección de acceso que independiza los enlaces ascendente y descendente, conocida como *Downlink Uplink Decoupling* (DUDe) [15], de forma que cada usuario se asocie a aquel elemento que minimice los recursos necesarios para la transmisión. A continuación se presentarán los principales resultados del análisis de estas soluciones ante diferentes configuraciones.

El escenario que se ha utilizado durante el análisis está descrito en la Tabla II, que indica la topología del despliegue y los modelos de propagación implementados, que son los definidos en las recomendaciones del 3GPP. Se contemplan 7 celdas, desplegadas siguiendo un patrón hexagonal, y un número variable de *small-cells* en la zona de de las *macro-cells* central. Sobre este escenario se han desplegado varios usuarios, y se han aplicado las diferentes técnicas de selección: (1) *RSRP*, (2) técnicas CRE con diferentes valores de bias, y (3) DUDe.

Como se ha comentado anteriormente, este análisis se centra en el efecto que tienen las diferentes soluciones de selección de acceso sobre la potencia de transmisión necesaria en el enlace ascendente. Para ello se ha asumido que todos los usuarios requieren un valor de *Signal to Noise plus Interference Ratio* (SINR) fijo de 5 dB, y se ha considerado que el sistema se encuentra en condiciones de saturación. Bajo estas premisas, se calcula la potencia de transmisión necesaria para que cada usuario alcance la SINR objetivo, de acuerdo al modelo de control de potencia en lazo abierto definido en la Ecuación 1 [16]:

$$P_{tx}[dBm] = \min P_{max}, P_0 + 10 \log_{10}(N_{RB}) + \alpha L \quad (1)$$

donde P_{tx} y P_{max} representan la potencia transmitida, y su valor máximo, respectivamente; P_0 indica la potencia que se transmite por unidad de recurso, N_{RB} el número de recursos necesarios para transmitir, L las pérdidas de propagación y α es el factor de compensación de propagación, que se ha fijado en 0.4. Los parámetros P_{max} y P_0 se han fijado a 24 y -80 dBm, respectivamente.

Tabla II: Configuración de la simulación

despliegue LTE FDD 2x20 MHz @2.1 GHz	
Capa Macro	ISD 500 m, 7 tri-sector sites Max. tx. power 46 dBm Ganancia de antena 15dBi, 15 down-tilt
Capa Small	Despliegue aleatorio Max. potencia transmisión 37dBm Omni-antenna
UE	DL NF 7dB Rx. Gain 7dB Max. Potencia transmisión
Despliegue LTE	L (dB) función de la distancia d [m]
Macro _{NLOS}	$139.1033 + 39.0864 * (\log_{10}(d) - 3)$
Macro _{LOS}	$36.2995 + 22 * \log_{10}(d)$ if $d < 328.42$ $40 * \log_{10}(d) - 10.7953$ if $d > 328.42$
Small _{NLOS}	$145.48 + 37.5 * (\log_{10}(d) - 3)$
Small _{LOS}	$103.8 + 20.9 * (\log_{10}(d) - 3)$
	Probabilidad LOS función de la distancia d [m]
Macro	$P_{LOS} = \min(\frac{18}{d}, 1) \cdot (1 - e^{-\frac{d}{36}}) + e^{-\frac{d}{36}}$
Small	$P_{LOS} = 0.5 - \min(0.5, 5 \cdot e^{-\frac{156}{d}}) + \min(0.5, 5 \cdot e^{-\frac{d}{30}})$

Antes de analizar el comportamiento global de las diferentes estrategias de acceso, se ha estudiado la mejora potencial que se puede obtener en un escenario sencillo, en el que se sitúa una estación base de cada tipo, *macro* y *small*, con una separación de 1000 m entre ellas. Se asume que un usuario se irá desplazando en la línea recta que une ambos elementos de acceso, para caracterizar la potencia necesaria en el *uplink* en función de la posición en la que se encuentre. La Figura 3 muestra la potencia de transmisión en función de la distancia a la estación base *macro*. Cada punto representa el promedio de 1000 experimentos independientes, de manera que pueden haberse dado situaciones de conexión con cualquiera de las dos estaciones base, así como los percentiles 10 y 90 de dicha potencia de transmisión. Además, se indica el punto en el con mayor probabilidad se cambia de estación base. Como muestra la Figura 3, el uso de técnicas CRE supone una notable ventaja en lo que se refiere a la utilización de la *small-cell*, de forma que cuanto mayor es el valor del bias, el traspaso de la *macro* a la *small-cell* ocurre antes. Siguiendo esta tendencia, se puede observar que el uso de DUDe aporta una mejora sustancial respecto a las otras alternativas, comprobándose que la variación de la potencia transmitida se reduce. De alguna manera, la técnica DUDe equivale a usar CRE con un valor de bias optimizado en cada momento.

A modo de resumen, la Figura 4 muestra los valores medio y máximo de potencia, utilizando las diferentes soluciones de selección de acceso. La figura muestra además de los valores globales (Max y Mean), los valores relativos a los casos en que se conecta a la estación base *macro* (Max_M y Mean_M) y *small* (Max_S y Mean_S). En general, se puede observar que a medida que aumenta el bias de CRE, y especialmente con el uso de DUDe, la potencia media necesaria al conectarse con la *small-cell* se incrementa, como consecuencia de que la conexión se establece con anterioridad. Sin embargo, también se observa que el hecho de potenciar el uso de las *small-cells* no conlleva una mejora sustancial en la potencia media

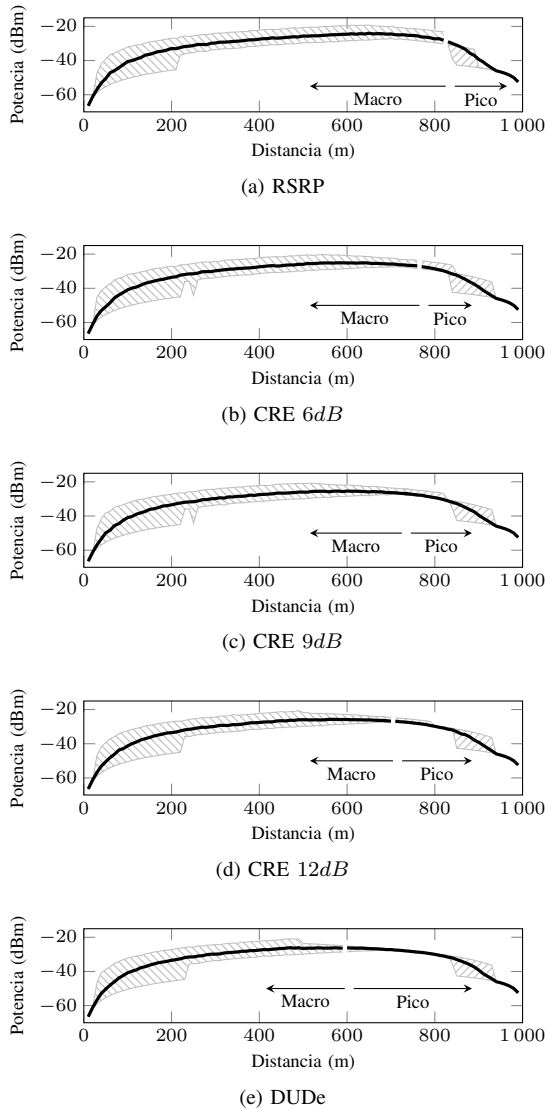


Fig. 3: Potencia media de transmisión en el enlace descendente a diferentes distancias de las estaciones base. La superficie sombreada delimita los percentiles del 10 y 90%

transmitida, que se mantiene bastante constante para las diferentes estrategias de selección de acceso.

Finalmente se ha estudiado el rendimiento global de las diferentes técnicas en el escenario descrito en la Tabla II. Bajo la zona de cobertura de cada una de las *macro-cell* se ha desplegado un número creciente de *small-cells*, y se ha evaluado el comportamiento global de 6000 conexiones. La Figura 5 muestra la potencia media transmitida por cada una de las asociaciones usando las diferentes soluciones de selección de acceso, y para diferentes densidades de *small-cells*. Como se puede observar, al incrementar la presencia de *small-cells* se reduce notablemente la potencia necesaria para transmitir, siendo mucho menos relevante el impacto de las diferentes soluciones de selección de acceso. Además, la Figura 6 presenta la probabilidad de realizar una asociación con una *macro-cell* ante diferentes densidades de *small-cells*.

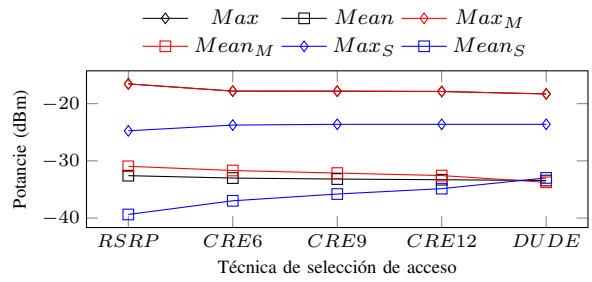


Fig. 4: Resumen de la potencia transmitida en las diferentes configuraciones. El eje de abscisas indica la técnica de acceso

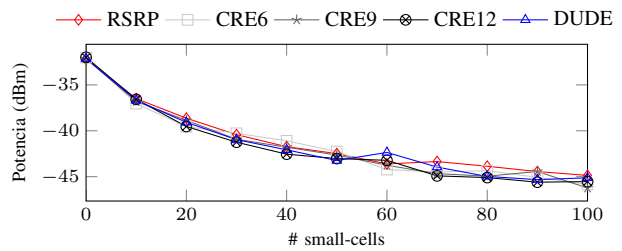


Fig. 5: Potencia media de transmisión ante diferente número de *small-cells* desplegadas

En este caso, sí se puede observar una diferencia notable para las diferentes técnicas de acceso utilizadas, de forma que *DUDe* consigue incrementar considerablemente las conexiones con las *small-cells*, que incluso se llegan a duplicar, si se comparan con *RSRP*. Como es de esperar, esta diferencia se mitiga a medida que la densidad de *small-cells* aumenta.

IV. CONCLUSIONES

Aunque la eclosión de las nuevas tecnologías ha ampliado de manera considerable las posibilidades de las redes celulares, su estudio se ha vuelto notablemente más complejo. En este sentido, la comunidad investigadora no se limita a analizar nuevas técnicas y soluciones que mejoren la calidad de los servicios, sino que es necesario evaluar las nuevas tendencias que afectan a las redes desde un punto de vista de su arquitectura. Como consecuencia, en este trabajo se ha argumentado que no existe una metodología o entorno de análisis de-facto. Así, aunque

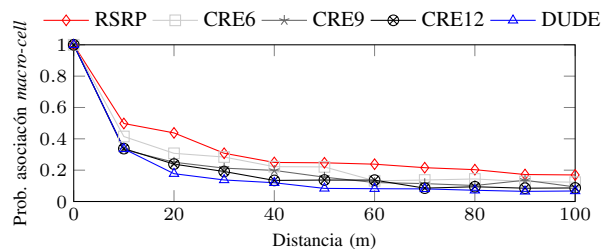


Fig. 6: Probabilidad media de asociación con la *macro-cell*. El eje de abscisas indica el número de *small-cells* desplegadas

existen diversas alternativas, cada una de ellas presenta limitaciones, especialmente desde el punto de vista del impacto de los servicios (y los patrones de tráfico asociados) y de la cada vez mayor complejidad de las topologías.

Con el objetivo de dar respuesta a estas limitaciones, en este trabajo se ha presentado un entorno de simulación alternativo, *Generic Wireless Network System Modeler-GWNSyM*. Su flexibilidad permite la definición de diferentes tipos de escenarios, que pueden analizarse de manera relativamente rápida y sencilla. Esta herramienta ha sido validada mediante el estudio de diferentes técnicas de selección de acceso, sobre un escenario heterogéneo. El análisis se ha centrado en cómo las diferentes técnicas explotan las capacidades adicionales de las *small-cells* y cómo esto afecta a la potencia transmitida en el enlace ascendente, desde el usuario a la estación base. De acuerdo a los resultados obtenidos, las nuevas técnicas, principalmente *DUDe*, son capaces de fomentar las conexiones con las estaciones base de menor capacidad. Sin embargo, mientras que la densificación de la red permite conseguir reducciones notables de la potencia transmitida, no se ha puesto de manifiesto un gran impacto de las diferentes técnicas.

Dada la flexibilidad del entorno de simulación presentado, se pretende aprovecharlo en diferentes ámbitos. En concreto, y en relación al análisis inicial presentado en este trabajo, en el futuro se pretende mejorar el modelado del escenario, teniendo en cuenta la evolución de los servicios, haciendo uso de un patrón de tráfico más acorde con los utilizados en la realidad. Además, se hará uso de herramientas que permitan establecer límites teóricos al rendimiento de las diferentes técnicas de selección, para lo que se integrarán algoritmos de optimización, tal y como ya se ha hecho previamente [17].

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 del proyecto ADVICE, Dynamic provisioning of connectivity in high density 5G wireless scenarios (TEC2015- 71329-C2-1-R).

REFERENCIAS

- [1] C. and/or its affiliates, "Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update, 2015–2020 white paper," Feb. 2016. [Online]. Available: <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>
- [2] N. Bhushan, J. Li, D. Malladi, R. Gilmore, D. Brenner, A. Damnjanovic, R. Sukhavasi, C. Patel, and S. Geirhofer, "Network densification: the dominant theme for wireless evolution into 5g," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 82–89, February 2014.
- [3] F. Boccardi, R. W. Heath, A. Lozano, T. L. Marzetta, and P. Popovski, "Five disruptive technology directions for 5g," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 74–80, February 2014.
- [4] M. Peng, Y. Li, Z. Zhao, and C. Wang, "System architecture and key technologies for 5g heterogeneous cloud radio access networks," *IEEE Network*, vol. 29, no. 2, pp. 6–14, March 2015.
- [5] M. Agiwal, A. Roy, and N. Saxena, "Next generation 5g wireless networks: A comprehensive survey," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2016.
- [6] C. Mehlführer, J. Colom Ikuno, M. Šimko, S. Schwarz, M. Wrulich, and M. Rupp, "The vienna lte simulators - enabling reproducibility in wireless communications research," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2011, no. 1, pp. 1–14, 2011. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1186/1687-6180-2011-29>
- [7] "The ns-3 network simulator," <http://www.nsnam.org/>.
- [8] G. Piro, N. Baldo, and M. Miozzo, "An lte module for the ns-3 network simulator," in *Proceedings of the 4th International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques*, ser. SIMUTools '11. ICST, Brussels, Belgium, Belgium: ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), 2011, pp. 415–422. [Online]. Available: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2151054.2151129>
- [9] C. Schneider and R. S. Thomä, "Evaluation of lte link-level performance with closed loop spatial multiplexing in a realistic urban macro environment," in *Antennas and Propagation (EUCAP), 2012 6th European Conference on*, March 2012, pp. 2725–2729.
- [10] R. M. Fujimoto, K. Perumalla, A. Park, H. Wu, M. H. Ammar, and G. F. Riley, "Large-scale network simulation: how big? how fast?" in *Modeling, Analysis and Simulation of Computer Telecommunications Systems, 2003. MASCOTS 2003. 11th IEEE/ACM International Symposium on*, Oct 2003, pp. 116–123.
- [11] J. Pelkey and G. Riley, "Distributed simulation with mpi in ns-3," in *Proceedings of the 4th International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques*, ser. SIMUTools '11. ICST, Brussels, Belgium, Belgium: ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), 2011, pp. 410–414. [Online]. Available: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2151054.2151128>
- [12] J. C. Ikuno, *LTE Link- and System-Level Simulation*. John Wiley & Sons, Ltd, 2011, pp. 243–270. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1002/9781119954705.ch11>
- [13] M. Taranetz, T. Blazek, T. Kropfreiter, M. K. Müller, S. Schwarz, and M. Rupp, "Runtime precoding: Enabling multipoint transmission in lte-advanced system-level simulations," *IEEE Access*, vol. 3, pp. 725–736, 2015.
- [14] A. Damnjanovic, J. Montojo, Y. Wei, T. Ji, T. Luo, M. Vajapeyam, T. Yoo, O. Song, and D. Malladi, "A survey on 3gpp heterogeneous networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 18, no. 3, pp. 10–21, June 2011.
- [15] F. Boccardi, J. Andrews, H. Elshaer, M. Dohler, S. Parkvall, P. Popovski, and S. Singh, "Why to decouple the uplink and downlink in cellular networks and how to do it," *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 3, pp. 110–117, March 2016.
- [16] 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.
- [17] L. Diez, G. P. Popescu, and R. Agüero, "A geometric programming solution for the mutual-interference model in hetnets," *IEEE Communications Letters*, vol. 20, no. 9, pp. 1876–1879, Sept 2016.