



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



**Máster Universitario**  
en Tecnologías, Sistemas y  
Redes de Comunicaciones

# **Evaluación de Prestaciones de las Tecnologías Radio Candidatas IMT-2020**

*Autor:* Daniel Gustavo Maldonado Hurtado

*Director:* Jose Francisco Monserrat del Río

*Director Experimental:* David Martín-Sacristán Gandía

*Fecha de comienzo:* 26/02/2018

*Lugar de trabajo:* Grupo de Comunicaciones Móviles del iTEAM



*Objetivos* — En esta Tesina de Máster se evalúan algunas características de las tecnologías radio candidatas a la 5G. En concreto, siguiendo el procedimiento propuesto por la ITU-R para la evaluación IMT-2020, se han implementado los nuevos modelos de canal a partir de la evolución del simulador disponible en el iTEAM. Finalmente, se ha evaluado la correcta implementación mediante un proceso de calibración siguiendo el estándar. Este objetivo general se puede detallar en los siguientes objetivos:

- Implementar los modelos de pérdidas de propagación (PL – *Propagation Loss*) propuestos por la ITU-R para la evaluación de IMT-2020.
- Implementar los modelos de generación de parámetros de gran escala (LSP – *Large Scale Parameters*) propuestos por la ITU-R para la evaluación de IMT-2020.
- Implementar los modelos para generación de coeficientes de canal con parámetros de pequeña escala (SSP – *Small Scale Parameters*) propuestos por la ITU-R para la evaluación de IMT-2020.
- Calibrar la implementación de los modelos de canal con los resultados del proponente 3GPP.

*Metodología* — Para poder cumplir los objetivos propuestos, fue necesario el estudio y análisis de las guías para evaluación de tecnologías de radio-interfaces de la ITU-R disponibles y actualizadas tanto para la tecnología IMT-*Advanced*, como para la tecnología IMT-2020. De esta manera se pudo obtener un estudio comparativo de ambas guías mediante el cual se identificó las similitudes y diferencias de los entornos de prueba, modelos de canal, procedimientos, y pasos a seguir para la generación de los coeficientes de canal de los enlaces, utilizados en las simulaciones de sistema.

De igual manera, fue necesario estudiar la implementación del código fuente del programa de simulación de propiedad del GCM del iTEAM, de manera que se identificó cómo se plasmaron los procedimientos de las guías de evaluación de tecnologías radio para IMT-A.

Finalmente, se planteó el procedimiento mediante el cual realizar la evolución del programa de simulación para incorporar las capacidades necesarias y poder realizar las simulaciones a nivel de sistema de las nuevas tecnologías radio IMT-2020 y se procedió con la implementación del software. Para poder corroborar el funcionamiento de la nueva implementación, se llevó a cabo una exhaustiva calibración de canal en la configuración A del escenario Indoor Hotspot con 1 y 3 TRxP por emplazamiento, y con las variantes de modelo propuestas por la ITU-R.

*Desarrollos teóricos realizados* — No existe un desarrollo teórico explícito asociado a esta Tesina de Máster, pero si una propuesta metodológica, cuya validez se verificó mediante la calibración final de la implementación llevada a cabo. Además, se revisó la información relativa a los nuevos modelos para evaluación de IMT-2020, que contiene una importante componente teórica, como se recoge en esta tesina, en todo lo relativo a los modelos de canal.

*Desarrollo de prototipos y trabajo de laboratorio* — Una vez definido el procedimiento de actualización del programa de simulación de IMT-A del GCM, se realizó la implementación de los nuevos procedimientos y modelos mediante programación en lenguaje C++ con el IDE Eclipse. Al haberse determinado que los pasos del modelo de desvanecimiento rápido de la tecnología IMT-A son iguales en IMT-2020, y este representa en forma general la estructura del programa, se pudo proceder con la actualización del diseño de red, generación de parámetros generales, generación de parámetros de gran escala LSP, generación de parámetros de pequeña

escala SSP, y generación de coeficientes de canal para cada uno de los enlaces a nivel de sistema. Mediante las salidas disponibles implementadas anteriormente en el programa de simulación, se puede obtener la ganancia de acoplamiento y el *wideband SINR*. Además, con la ayuda de un script desarrollado en Matlab, se pueden obtener las CDF de ambos parámetros y proceder con la calibración de canal. Lo que se realizó es una comparativa con los resultados recogidos por parte del 3GPP, donde varios de sus miembros han presentado ya sus calibraciones para varios entornos de prueba y configuraciones.

*Resultados* — Mediante el procedimiento desarrollado se logró una implementación exitosa de los modelos planteados por la ITU-R. Se generaron los nuevos escenarios requeridos para la evaluación de las tecnologías radio IMT-2020, resultantes de la combinación de entornos de prueba, casos de uso y variantes del modelo de canal, que conviven con los escenarios existentes para la evaluación de tecnologías de radio IMT-A. Mientras que algunos procedimientos pudieron ser actualizados para que realicen las funciones en ambas tecnologías, otros procedimientos se incluyeron en nuevas funciones consistentes en las fórmulas, modelos y procedimientos que cubren la evaluación de IMT-2020. La enorme complejidad de los nuevos modelos de canal está evidenciada por las exigentes prestaciones que se requieren de los equipos de computación, así como la larga duración de las simulaciones. Mediante la calibración de canal se pudo comprobar la correcta implementación de los modelos para los escenarios Indoor Hotspot con 1 y 3 TRxP por emplazamiento, con las variantes de modelo A y B, en la configuración A.

*Líneas futuras* — Para poder completar la evolución del programa de simulación completo, quedan muchas tareas pendientes, en especial las relacionadas con el nivel de enlace que sale del tema de esta tesina. Una de las tareas propuestas que debe ser realizada en un futuro para poder comprobar la correcta implementación de todos los modelos de canal mediante la calibración de canal, es realizar el mapeo de los puertos de antena requeridos para la generación de haces, que son una de las principales novedades y puntos clave para obtener las elevadas tasas de transmisión de datos esperadas en las tecnologías IMT-2020. Después se debería continuar con la implementación del simulador a nivel de enlace incluyendo la propuesta del 3GPP recogida en la Release 15, cuyo proceso de evaluación se llevará a cabo a lo largo del próximo año.

*Publicaciones* — De momento, no se ha publicado el trabajo desarrollado en esta Tesina de Máster, aunque se prevé que el uso del nuevo simulador quede publicado en los próximos meses.

*Abstract* — Within the IMT-2020 evaluation framework provided by ITU-R, the procedures, formulas and configurations needed to implementation the IMT-2020 channel model have been defined. Therefore, this MSc thesis has created a procedure to update the proprietary simulation software for IMT-A of the GCM of iTEAM, evolving this software application to run simulations on the performance of IMT-2020 proposals. 3GPP New Radio standard for 5G is the principal candidate target of this implementation. Therefore, all the assumptions and configurations of 3GPP proponent have been taken in account. Indoor Hotspot - eMBB channel model implementation has been calibrated and checked against the own 3GPP calibration.

Autor: Maldonado Hurtado Daniel Gustavo, email: [damalhur@teleco.upv.es](mailto:damalhur@teleco.upv.es)  
Director 1: Monserrat del Río Jose Francisco, email: [jomondel@dc.com.upv.es](mailto:jomondel@dc.com.upv.es)  
Fecha de entrega: 11-09-18

**ÍNDICE**

<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	4
I.1. MOTIVACIÓN .....	4
I.2. OBJETIVOS.....	5
I.3. PRINCIPALES RESULTADOS.....	5
I.4. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO .....	6
<b>II. ESTADO DEL ARTE</b> .....	6
II.1. PROCESO DE EVALUACIÓN DE LA 5G.....	6
II.2. CASOS DE USO, CAPACIDADES Y REQUERIMIENTOS MÍNIMOS .....	7
II.3. HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN EN C++ PROPIEDAD DEL GCM.....	10
II.4. CALIBRACIÓN DE MODELOS DE CANAL IMT-2020 .....	11
<b>III. MODELOS IMT-2020</b> .....	12
III.1. EVOLUCIÓN DEL MARCO DE EVALUACIÓN DE IMT-A.....	12
III.2. MARCO Y PROCESO PARA LA EVALUACIÓN DE IMT-2020 .....	13
III.3. ENTORNOS DE PRUEBA Y CONFIGURACIONES DE LA EVALUACIÓN .....	15
III.4. MODELADO DE CANAL IMT-2020.....	18
<b>IV. IMPLEMENTACIÓN</b> .....	24
IV.1. ENTORNO DE DESARROLLO .....	25
IV.2. PROGRAMACIÓN NIVEL SISTEMA PARA LA EVALUACIÓN IMT-2020 .....	25
IV.3. CALIBRACIÓN DE CANAL.....	33
<b>V. RESULTADOS DE CALIBRACIÓN</b> .....	34
<b>VI. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS</b> .....	37
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	37
<b>REFERENCIAS</b> .....	38

## I. INTRODUCCIÓN

Al encontrarnos cerca de alcanzar la tercera década del siglo XXI, las comunicaciones móviles forman parte de la vida cotidiana en todo el mundo, con mayor incidencia en los países desarrollados.

Cuando revisamos la evolución de la telefonía móvil [1], encontramos que el desarrollo de las interfaces de usuario con pantallas táctiles y de los teléfonos inteligentes permitió la verdadera integración del internet y la telefonía móvil. Además, la aparición de equipos de usuario móviles con capacidades de procesamiento similares a las de un ordenador desencadenó el incremento del tráfico de datos en las redes móviles. Esto finalmente provocó que los despliegues basados en la tercera generación de estándares (3G) se evidenciarán desbordados en capacidad. La puesta en marcha de la tecnología *Long Term Evolution* (LTE) brindó una mayor velocidad de descarga de información en redes móviles, incrementando notablemente el acceso y contribución por parte de usuarios particulares a contenidos multimedia, lo que a su vez incrementa la demanda de capacidad para las infraestructuras de acceso móvil. Al mismo tiempo, el incremento del mercado de aplicaciones para terminales móviles inteligentes y la comunicación directa entre dispositivos que da marcha el desarrollo de comunicaciones entre vehículos y el despliegue del *Internet of Things* (IoT), plantean nuevos retos para las redes de acceso móviles, relacionados a la seguridad de datos sensibles, la baja latencia, y la alta densidad de usuarios.

Mediante la estandarización de *IMT-Advanced*, lo que se conoce popularmente como la cuarta generación móvil o 4G, se han logrado alcanzar grandes hitos en las comunicaciones móviles, pero las proyecciones de tráfico para la siguiente década siguen dejando en claro que una nueva tecnología es necesaria. Por ello, desde el año 2013 se está desarrollando la estandarización de una nueva generación de redes móviles ultra-flexibles, de mayor capacidad y velocidad, de alta fiabilidad y disponibilidad: bienvenidos a la era de la 5G.

### I.1. MOTIVACIÓN

Al final del tercer cuarto del año 2015, la *Unión Internacional de las Telecomunicaciones, Sector de Radiocomunicaciones* (ITU-R) en su recomendación M.2083.0 “Concepción de las IMT – Marco y objetivos generales del futuro desarrollo de las IMT para 2020 y en adelante” estableció la conceptualización de lo que será la quinta generación móvil, la 5G, basándose en las posibles tendencias en el comportamiento del usuario y en las aplicaciones, del crecimiento del tráfico, de las tendencias tecnológicas y de la incidencia en el espectro. Todo esto dio inicio al cronograma para el desarrollo de las IMT-2020 (*Telecomunicaciones Móviles Internacionales para 2020*).

Un gran número de nuevas características y tecnologías han sido incorporadas en este desarrollo y existen varios organismos, como el 3GPP y el IEEE, trabajando activamente en la estandarización de las futuras tecnologías 5G. Para su aprobación, lo que las habilitaría a acceder al uso de un espectro inmenso, es necesario utilizar una metodología y modelos concretos para realizar la evaluación de las propuestas tecnológicas de estos grupos de estandarización, mediante una base común y

comparable, además de verificar su cumplimiento con los requisitos tecnológicos mínimos exigidos para IMT-2020.

Es así que la ITU-R ha desarrollado y publicado las recomendaciones que incluyen los requisitos, los criterios y las guías para evaluación de las tecnologías de radio interfaces para IMT-2020, y serán el objeto de investigación y desarrollo de esta Tesina.

Además, cabe destacar en la motivación de esta tesina que el *Grupo de Comunicaciones Móviles (GCM)* del *Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (iTEAM)* de la Universitat Politècnica de València cuenta con un programa propietario de simulación desarrollado en C++ que fue ya utilizado con éxito en la evaluación de IMT-A (*Telecomunicaciones Móviles Internacionales Avanzadas*). La motivación de esta Tesina de Máster está en la necesaria actualización de las capacidades de este software para poder abarcar la evaluación de las nuevas tecnologías IMT-2020 y obtener resultados que se alinean con las necesidades actuales de la sociedad científica y tecnológica de las Telecomunicaciones.

## I.2. OBJETIVOS

En esta Tesina de Máster se pretende realizar la evaluación de algunas características de las tecnologías radio candidatas a la 5G. En concreto, siguiendo el procedimiento propuesto por la ITU-R para la evaluación IMT-2020, se implementarán los nuevos modelos de canal y se realizará la evolución del simulador disponible del iTEAM. Finalmente, se realizará una evaluación de la implementación mediante un proceso de calibración.

Este objetivo general se puede detallar en los siguientes objetivos:

- Implementar los modelos de pérdidas de propagación (PL – *Propagation Loss*) propuestos por la ITU-R para la evaluación de IMT-2020.
- Implementar los modelos de generación de parámetros de gran escala (LSP – *Large Scale Parameters*) propuestos por la ITU-R para la evaluación de IMT-2020.
- Implementar los modelos para generación de coeficientes de canal con parámetros de pequeña escala (SSP – *Small Scale Parameters*) propuestos por la ITU-R para la evaluación de IMT-2020.
- Calibrar la implementación de los modelos de canal con los proponentes del 3GPP.

## I.3. PRINCIPALES RESULTADOS

Mediante el procedimiento desarrollado se logró una implementación exitosa de los modelos planteados por la ITU-R. Se generaron los nuevos escenarios requeridos para la evaluación de las tecnologías radio IMT-2020, resultantes de la combinación de entornos de prueba, casos de uso y variantes del modelo de canal, que conviven con los escenarios existentes para la evaluación de tecnologías de radio IMT-A. Mientras que algunos procedimientos pudieron ser actualizados para que realicen las funciones en ambas tecnologías, otros procedimientos se incluyeron en nuevas

funciones consistentes en las fórmulas, modelos y procedimientos que cubren la evaluación de IMT-2020. La enorme complejidad de los nuevos modelos de canal está evidenciada por las exigentes prestaciones que se requieren de los equipos de computación, así como la larga duración de las simulaciones. Mediante la calibración de canal se pudo comprobar la correcta implementación de los modelos para los escenarios Indoor Hotspot con 1 y 3 TRxP por emplazamiento, con las variantes de modelo A y B, en la configuración A.

#### *I.4. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO*

El resto del documento se estructura de la siguiente manera. En la sección II se realiza una revisión del estado del arte enfocada en el proceso de evaluación de la quinta generación de sistemas de comunicación móviles, los nuevos casos de uso, capacidades y requerimientos de la tecnología IMT-2020, el programa de simulación del GCM del iTEAM para simulación de sistemas IMT-A, y el procedimiento de calibración de canal en base a los modelos establecidos para IMT-2020 por parte de la ITU-R. En la sección III se realiza un estudio detallado del marco de evaluación para tecnologías de radio-interface IMT-2020 y su evolución en relación con el marco de evaluación de IMT-A. En la sección IV se detalla los pasos del modelo de desvanecimiento rápido utilizado para la generación de coeficientes de canal que permite una simulación a nivel de sistema. Además, se explica la forma en la que se incluyeron los nuevos modelos para IMT-2020. En la sección V se presentan los resultados de la calibración de canal realizada en el escenario Indoor Hotspot – eMBB en la configuración A. Por último, en la sección VI se indican las respectivas conclusiones obtenidas mediante la presente investigación y, finalmente, se proponen líneas futuras de investigación, ya que el proceso de evaluación dentro del marco propuesto por la ITU se encuentra aún en etapa de calibración de canal.

## **II. ESTADO DEL ARTE**

A lo largo de este capítulo realizaremos una revisión del avance de la estandarización del 5G, de la mano del principal proponente 3GPP (*3rd Generation Partnership*), y de las capacidades y nuevos requerimientos planteados por la ITU-R.

Además, se revisará la estructura y funcionalidades que presenta actualmente la herramienta de simulación en C++ propietaria del GCM del iTEAM, usado en la evaluación de IMT-A ITU-R y los proyectos METIS y METIS II.

### *II.1. PROCESO DE EVALUACIÓN DE LA 5G*

Las primeras investigaciones para 5G iniciaron en alrededor de 2010 y los principales consorcios de investigación se lanzaron alrededor del 2012, destacando el proyecto Europeo METIS. A continuación, el desarrollo de varias iniciativas de investigación y pruebas colaborativas en todo el mundo, permitió al 3GPP lanzar un proceso de estandarización muy enfocado y poco exploratorio,



donde se está trabajando de manera frenética en la definición de los estándares 5G, habiéndose recientemente completado la primera fase del estándar. Pronto veremos eventos deportivos de escala mundial donde se realizarán pruebas pilotos y primeros despliegues.

A pesar que los despliegues comerciales están ya planificados para inicios de 2019, aún quedan muchos temas pendientes sin respuesta y mucha investigación por hacer. Esto se viene produciendo por la necesidad de cumplir con los plazos de estandarización, llevando a acelerar la implementación de ciertas características prioritarias y posponiendo otras que pertenecen a la visión original del 5G.

Al tiempo de la realización de esta investigación, la *Release 15* del 3GPP ha sido finalizada, también denominado como Fase 1, y ha dado como resultado la conclusión de la especificación de la tecnología *New Radio* (NR), que incluye un subconjunto de funcionalidades 5G que permitirán las primeras comercializaciones de NR *non-stand-alone* (NSA), donde 5G sólo puede existir mediante un despliegue previo de LTE, y operación NR *stand-alone* (SA), donde la red será enteramente 5G.

Como se explica en [2], esta aceleración de la estandarización en el 3GPP y la priorización de ciertas características, han llevado a que, en este momento, las tecnologías se centren en el caso de uso de mayor ancho de banda, dejando para futuras *Releases* otros casos de uso de mayor complejidad técnica. Un ejemplo claro de esto es la selección de la forma de onda *cyclic prefix based orthogonal frequency division multiplex* (CP-OFDM). Esto puede resultar ventajoso para brindar anchos de banda elevados o algunos casos de baja latencia y alta confianza, pero puede que no cubra las necesidades de comunicación entre máquinas.

Sin embargo, el 3GPP está obligado a que, sin importar qué sea implementado en las primeras versiones de 5G, el nuevo estándar NR sea compatible con las versiones futuras que se implementen. De hecho, se espera que las *Releases 15* y *16* de la tecnología NR, que se completarán en 2020, junto con la evolución de LTE conocida como eLTE cumplan con los requisitos marcados por la ITU-R en el procedimiento de validación IMT-2020.

Dentro del marco general para la evaluación de IMT-2020, la ITU-R ha fijado en los informes pertinentes los requisitos técnicos mínimos [3] y la guía de evaluación [4], los cuales serán usados en el proceso de entrega y evaluación de las distintas propuestas tecnológicas [5].

Los pasos principales del proceso de la ITU-R se recogen en la Fig. 1. Cabe destacar que la ITU-R no se encarga de especificar los estándares ni de realizar la evaluación de candidatos, sino que existirá un grupo de evaluadores externos que se encargue de ello. Es aquí donde la ITU-R ha solicitado la colaboración de grupos científicos del mundo para completar esta tarea.

## II.2. CASOS DE USO, CAPACIDADES Y REQUERIMIENTOS MÍNIMOS

Las tendencias que se evidenciaron y las tecnologías desarrolladas en estos años de investigación [7] han permitido divisar nuevos servicios y modelos de negocio, lo cual convierte a 5G no solo en una evolución de las redes de 4G con nuevas bandas de espectro, mayor eficiencia espectral o mayor tráfico de datos.

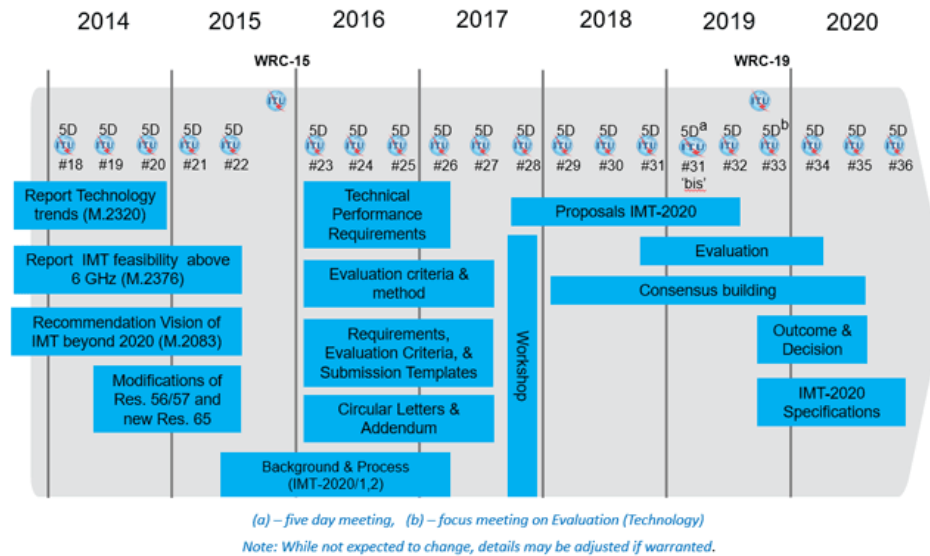


Fig.1. Línea de tiempo y proceso detallado de la evaluación IMT-2020 seguida por la ITU-R [6]

Las tecnologías IMT-2020 deben soportar nuevos y diversos casos de uso que van más allá de lo alcanzado por las actuales tecnologías *IMT-Advanced*, y presentan una gran variedad de nuevas capacidades que van ligadas a estos casos de utilización y aplicaciones. Los principales casos de uso son los siguientes tres:

- *Banda ancha móvil mejorada (eMBB)*, se centra en el uso en que las personas accedan a ficheros multimedia, servicios y datos. Existen en este caso de uso requisitos de alta velocidad de transferencia de datos que se diversificarán de acuerdo al área de cobertura y la densidad de usuarios. En casos de cobertura inalámbrica en interiores o *hotspots* se requerirá una elevada capacidad de tráfico con usuarios moviéndose a baja velocidad en un área pequeña y alta densidad de usuarios, mientras que en áreas extensas se requerirá de un acceso homogéneo y movilidad media o alta, con una velocidad de datos mayor a la existente pero que será inferior a la del caso anterior.
- *Comunicaciones de gran fiabilidad y baja latencia (URLLC)*, con requisitos muy estrictos de latencia, disponibilidad y confianza, como por ejemplo procesos industriales automatizados, cirugía a distancia, seguridad en los transportes, etc.
- *Comunicaciones masivas de tipo máquina (mMTC)*, caracterizado por una muy elevada densidad de dispositivos conectados que, generalmente, transmiten un volumen bajo de datos y no son sensibles al retardo. Además, la red debe facilitar la conexión de dispositivos que deberán ser de bajo costo y con una duración prolongada de batería.

Cabe recalcar que, en el futuro, pueden surgir nuevos casos de uso, por lo que la implementación de IMT-2020 debe presentar cierta flexibilidad para adaptarse a los nuevos requisitos que puedan surgir. Además, un solo diseño que pueda acomodarse a los tres casos de uso presentados es poco factible, especialmente desde el punto de vista económico y de eficiencia energética.

Se consideran ocho parámetros fundamentales en IMT-2020. En [7] se las describe como sigue:

*Máxima velocidad de datos*, velocidad de transferencia de datos máxima que puede alcanzarse en condiciones ideales por usuario/dispositivo (en Gbit/s), para 5G definida en 20 Gbps en enlace descendente y 10 Gbps en enlace ascendente. Para alcanzar estos valores se define una *eficiencia espectral máxima* de 30 bps/Hz en el enlace descendente y 15 bps/Hz en el enlace ascendente, considerando la disponibilidad de espectro entre 2 y 3 GHz.

*Velocidad de datos experimentada por el usuario*, velocidad de datos alcanzable que está disponible ubicuamente en la zona de cobertura para usuario/dispositivo móvil (en Mbit/s o Gbit/s), como *Key Performance Indicator (KPI)* corresponde al 5% de la *función de distribución acumulada (CDF)* de la tasa binaria o *throughput* y representa la mínima experiencia de usuario en el área de cobertura, definido en 100 Mbps en enlace descendente y 50 Mbps en el enlace ascendente. Para alcanzar estas tasas, igualmente se define la *eficiencia espectral del 5to percentil*, cuyos requerimientos mínimos dependen del escenario de test, y se podría considerar como la eficiencia espectral en el borde de la celda, mientras que la *eficiencia espectral promedio* se define como la tasa binaria promedio por unidad de recurso de espectro y por celda, de igual manera dependen del escenario de test.

*Latencia*, contribución de la red de radiocomunicaciones al tiempo que transcurre desde que la fuente envió un paquete hasta que lo recibe el destino (en ms). En el plano de usuario, los objetivos están planteados en 4 ms para eMBB y 1 ms para URLLC. En el plano de control, la latencia refleja la transición del estado *idle* al estado *active*, y el objetivo de esta transición ha sido fijado en 20 ms.

*Movilidad*, máxima velocidad a la que puede alcanzarse la calidad de servicio (QoS) definida y una transferencia sin interrupciones entre los nodos radioeléctricos que pueden pertenecer a diferentes capas y/o tecnologías de acceso radioeléctrico (multicapa/RAT) (en km/h). Para el escenario de pruebas *rural* se debe alcanzar una eficiencia espectral de 0.45 bps/Hz en el enlace ascendente a una velocidad de 500 km/h. De igual manera, el *tiempo de interrupción por movilidad* se define como el tiempo durante el cual el dispositivo no puede intercambiar paquetes por encontrarse en un proceso de *handover* o cambio de celda. El objetivo está fijado en 0 ms, lo cual significa que se debe obtener la conexión a una nueva celda antes de perder la conexión con la celda actual.

*Densidad de la conexión*, número total de dispositivos conectados y/o accesibles por unidad de superficie (por km<sup>2</sup>). Para el caso de mMTC, la ITU-R define como objetivo el de 1.000.000 de dispositivos por km<sup>2</sup>.

*Eficiencia energética*, en el lado de red, por eficiencia energética se entiende la cantidad de información que transmiten/reciben los usuarios por unidad de energía consumida en la red de acceso radioeléctrica (RAN) (en bit/julio); en el lado del dispositivo, por eficiencia energética se entiende la cantidad de bits de información por unidad de consumo de energía del módulo de comunicación (en bit/julio). Como objetivo la ITU-R define que las interfaces deben soportar capacidades de ratio en estado *sleep* elevado, de igual manera duraciones largas en estado *sleep*.

*Capacidad de tráfico de área*, caudal total de tráfico por zona geográfica (en Mbit/s/m<sup>2</sup>). La ITU-R ha definido este objetivo únicamente para el escenario de prueba *Indoor hotspot*, en 10 Mbps/m<sup>2</sup>.

*Confiabilidad*, se define como la probabilidad de transmitir con éxito un paquete en un tiempo determinado. El objetivo está fijado en transmitir exitosamente un paquete MAC de 32 bytes en menos de 1 ms en el borde de la celda en un escenario de pruebas Urbano denso con una probabilidad de 99,999%.

*Ancho de banda*, se refiere al máximo ancho de banda agregado que el sistema dispone. Por lo menos 100 MHz deben soportarse, pero la ITU-R motiva a los proponentes a soportar anchos de banda de más de 1 GHz.

Como se ha mencionado antes, aunque todas las capacidades fundamentales pueden ser en cierto modo importantes para la mayoría de los casos de uso, la relevancia de ciertas capacidades fundamentales puede ser considerablemente diferente en función del caso.

En la Fig. 2 se puede observar la relevancia que tienen ciertos indicadores dependiendo de los casos de uso, sea banda ancha móvil mejorada, comunicación de gran fiabilidad y baja latencia y comunicación masiva de tipo máquina. Se utiliza una escala indicativa de tres valores, elevado, medio y bajo, que hacen referencia a los objetivos descritos antes.

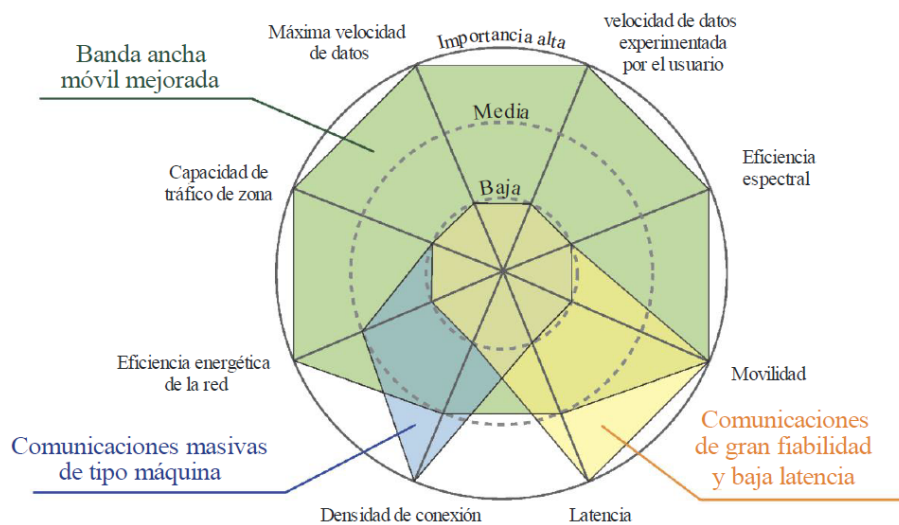


Fig.2. Importancia de las capacidades fundamentales para distintos casos de utilización [7]

### II.3. HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN EN C++ PROPIEDAD DEL GCM

En el proceso de definición de los estándares globales para comunicaciones móviles IMT-Advanced liderado por la ITU-R, el 3GPP propuso como candidata a la tecnología LTE-Advanced. Debido a que requería su evaluación para poder comprobar su cumplimiento con los requerimientos de la nueva tecnología, en especial aquellos que requieren de simulaciones, investigadores de GMC desarrollaron una plataforma de simulación a nivel de sistema para colaborar con esta tarea [8].

Siguiendo la Guía para la evaluación de Radio Interfaces para IMT-A y las especificaciones provistas por el 3GPP, crearon un simulador de nivel de sistema totalmente compatible con LTE-Advanced. Específicamente, el enlace descendente fue el enlace emulado, pues es el enlace con

mayor demanda. El proceso de desarrollo involucró calibraciones que permitieron validar el funcionamiento del simulador, y posteriormente se pudo evaluar las capacidades de LTE y LTE-*Advanced*, con el objeto de verificar el cumplimiento de los requerimientos de IMT-A.

Este simulador cuenta con estructura lógica que incluye *diseño de red, canal, mapeo del enlace al sistema, estaciones base y terminales móviles*, y una *fuentes de tráfico*, con funciones específicas, y que, interactuando entre ellas, obtienen los indicadores buscados para poder evaluar las propuestas tecnológicas.

El desarrollo de este simulador permitió la participación dentro del Grupo de evaluación independiente WINNER+, para la evaluación de la propuesta LTE-A como candidato a cumplir los requerimientos de la tecnología IMT-A, y confirmó que la misma satisfacía los requisitos exigidos por la ITU-R. De igual manera, permitió la participación en los proyectos METIS y METIS II para el desarrollo de las nuevas tecnologías en el desarrollo de las redes 5G. Esta tesina parte de este simulador para construir una herramienta compatible con el nuevo proceso iniciado por la ITU-R.

#### II.4. CALIBRACIÓN DE MODELOS DE CANAL IMT-2020

Una de las primeras etapas en el proceso de evaluación de IMT-2020 es la calibración de canal, tanto por los proponentes de la tecnología como por los grupos de evaluación independientes.

La calibración de canal permite comprobar, mediante la comparación de resultados obtenidos en términos de ganancia de acoplamiento (*coupling gain*), geometría en enlace descendente o *downlink (DL geometry)* con ruido blanco agregado, y *wideband SINR (signal to interference plus noise ratio)*, que los simuladores están bien implementados en base a las especificaciones provistas por los proponentes y los modelos especificados por la ITU-R, de manera que los resultados de evaluaciones que se lleven a cabo posteriormente sean comparables y válidas.

En cuanto a los proponentes, el 3GPP, como principal proponente con su estándar NR, ha completado su primera propuesta dentro de la especificación realizada en la Release 15. Además, en su último plenario RAN 78 se planificó un workshop para finales de Octubre de 2018, junto con el ITU-R WP5D, en el cual se incluirá la presentación a los grupos independientes de evaluación de la propuesta del 3GPP, de manera que se asegure el alineamiento de los escenarios de evaluación. Además, en este workshop se realizará la presentación de la auto-evaluación de la Release 15, incluyendo suposiciones de simulación y calibraciones de canal. Actualmente, se encuentra ya disponible el informe con las suposiciones y los resultados de calibración de 21 miembros del 3GPP [9], información que será tomada de referencia para la comprobación de los modelos implementados en el simulador propiedad del GCM.

Asimismo, la ITU-R ha notificado el registro como grupo de evaluación independiente de ATIS WTSC, 5G Infrastructure Association, ChEG Chinese Evaluation Group, Canadian Evaluation Group, Wireless World Research Forum, TCOE India, 5GMF, TTA SPG33, Trans-Pacific Evaluation Group, ETSI Evaluation Group, y Egyptian Evaluation Group. Para estos grupos ya

existen áreas de discusión con acceso restringido para ellos, en los cuales se ha recibido información de las propuestas iniciales de tecnologías para IMT-2020, incluyendo la auto-evaluación e información de calibración por parte del proponente “3GPP”, actualizaciones en el desarrollo de IMT-2020 del proponente “China”, una propuesta RIT por parte del proponente “ETSI”, y una propuesta RIT por parte del proponente “TSDP”. Toda la información mencionada se encuentra disponible en los documentos IMT-2020/3 (Rev. 1), IMT-2020/4 (Rev. 1), IMT 2020/5 (Rev. 1), IMT-2020/6, y IMT-2020/7, respectivamente. La información referente al proceso de evaluación regulado por la ITU-R se puede encontrar en [10].

### III. MODELOS IMT-2020

La diversidad de nuevos servicios que incluye 5G ha motivado la evolución y expansión de las metodologías de evaluación existentes. El objetivo es obtener un nuevo marco de evaluación que incluya los casos de uso definidos por la ITU-R, logrando una comparación justa de los conceptos planteados, y así poder evaluar las prestaciones de las nuevas propuestas.

Mediante la recomendación M.2410 [3] y M.2412 [4], la ITU-R provee respectivamente los requerimientos mínimos y una guía de los procedimientos, metodología y criterios para ser usados en la evaluación de las *tecnologías de interfaz radio* (RIT - *radio interface technologies*) o *conjunto de RITs* (SRITs) para una variedad de entornos de prueba o evaluación en el marco de estandarización de IMT-2020. Estos entornos permiten simular los casos de uso más exigentes. El procedimiento está diseñado de manera que permite evaluar de manera justa y común el rendimiento de los candidatos de RIT o SRITs de manera técnica, además de asegurar que se cumplan los objetivos de IMT-2020.

ITU-R ha definido, además, el proceso para la entrega y evaluación de las tecnologías candidatas IMT-2020 mediante su recomendación M.2411 [5]. Se han definido nueve pasos para obtener la aprobación de un candidato RIT o SRITs. Sin embargo, este tema queda fuera del alcance de esta investigación.

#### III.1. EVOLUCIÓN DEL MARCO DE EVALUACIÓN DE IMT-A

A pesar de que 5G incluye un conjunto de nuevas funcionalidades con respecto a las tecnologías anteriores, el marco de evaluación no parte de cero. Los procesos desarrollados para la evaluación de IMT-A brindan una clara experiencia de éxito, incluyendo tres componentes.

*Entornos de prueba*, que consisten en un *modelo de tráfico* basado en el servicio a evaluar, un *escenario de despliegue* que provee las características geográficas donde se implementa el servicio, y una *configuración de evaluación* que describe los parámetros a evaluar y la selección del tipo de tráfico y el escenario de despliegue.

*Metodología de evaluación y procedimientos*, para cada KPI, diferenciado en el método de alto nivel entre inspección, análisis o simulación, y el detalle del procedimiento y método de evaluación.

*Modelos de evaluación*, incluyendo modelos de canal, de antena, etc.

El 3GPP tomó como referencia el marco de evaluación de IMT-A utilizado para evaluar LTE y LTE-A, aportando pequeñas mejoras. Por otro lado, el IEEE elaboró una metodología para evaluar su propuesta de IMT-A, WiMAX (IEEE 802.16m), de manera que también estos modelos han servido de base para la elaboración de los modelos IMT-2020.

Los reportes M.2134 [11] y M.2135 [12] de la ITU-R proveen respectivamente los requerimientos para las interfaces y la guía para su evaluación en el marco del desarrollo de IMT-A, llevado a cabo en el 2009, y mediante el cual se desarrolló la herramienta de simulación en C++ propiedad del GCM. Por lo cual, es necesario un estudio comparativo de los contenidos de estos documentos con respecto a sus nuevas versiones para la estandarización de IMT-2020.

### III.2. MARCO Y PROCESO PARA LA EVALUACIÓN DE IMT-2020

IMT-2020 desde su concepción ha sido diseñado de tal manera que pueda ser considerado desde múltiples perspectivas, como usuarios, fabricantes, desarrolladores de aplicaciones, operadores de red y escenarios de uso, por lo cual es sumamente extenso. Por lo tanto, los candidatos para IMT-2020 deben ser capaces de ser útiles en un rango amplio de uso y entornos, con más diversidad de servicios y opciones de tecnologías. Considerar todas las variaciones es imposible. Sin embargo, la ITU-R ha determinado una visión representativa consistente con la resolución ITU-R 65 y los KPI definidos en [3]. Cabe mencionar que los parámetros usados para la evaluación no deben ser considerados como valores específicos con los cuales debería cumplir cualquier despliegue de sistemas para IMT-2020, ni tampoco como valores por defecto de referencia para futuros desarrollos.

A continuación, se procede a describir de manera breve la nueva metodología de evaluación y los entornos y configuraciones de evaluación para IMT-2020, referenciando donde sea necesario su similitud o diferencia con el marco de evaluación de IMT-A.

Los KPI escogidos para la evaluación, y explicados en extensión en [5], pueden ser considerados mediante los siguientes métodos de evaluación de alto nivel:

- *Simulación*, incluyendo simulaciones a nivel de enlace y nivel de sistema, de acuerdo a los principios de simulación descritos posteriormente.
- *Analítico*, a través de cálculos o análisis matemático.
- *Inspección*, revisando la funcionalidad y parametrización de la propuesta.

La evaluación debe ser realizada cumpliendo los parámetros técnicos provistos por el proponente y con las configuraciones específicas de cada entorno de prueba. Cada requisito debe ser evaluado de forma independiente, excepto la *eficiencia espectral promedio* y la *eficiencia espectral del quinto percentil de los usuarios*, los cuales deberán ser obtenidos de la misma simulación.

Para que la ITU pueda considerar una evaluación, es indispensable que la evaluación sea realizada usando métodos reproducibles, considerando los requisitos de cada entorno de pruebas, y basada en las propuestas técnicas provistas por los proponentes en base a la plantilla de la ITU-R. Además, la

propuesta unificada en software y en metodología que emule el canal, la simulación de nivel de enlace, y la interface del enlace al sistema, deben soportar múltiples propuestas.

El sistema de simulación es un sistema completo que puede estar compuesto de las simulaciones de nivel de enlace y simulaciones de nivel de sistema. Las características de las simulaciones de nivel de sistema deben estar basadas en el diseño de la red definido de acuerdo al entorno de pruebas, y los principios que deben ser seguidos, y que son idénticos a los definidos en el marco de evaluación de IMT-A, se pueden encontrar en la sección 7.1 de [4].

Dentro de los KPI obtenidos a través de simulación, IMT-2020 los nombra de la siguiente manera, manteniendo relación tanto en capacidad como en procedimiento con el marco de evaluación de IMT-A y descritos a continuación.

- *Eficiencia espectral promedio*, equiparable a la eficiencia espectral por celda de IMT-A basada en el uso de varios *drops* o realizaciones de la simulación, de acuerdo a los pasos y procedimientos descritos en la sección 7.1.1 en [4].
- *Eficiencia espectral de 5to percentil de usuarios*, totalmente compatible con el promedio de la eficiencia espectral de usuario en el extremo de una celda de IMT-A basado en varios *drops*, de acuerdo a los pasos y procedimientos descritos en la sección 7.1.2 en [4].
- *Densidad de conexión*, no se encuentra presente en el marco de evaluación de IMT-A, y se refiere al número de dispositivos que cuenten con cierta QoS en una unidad de área, de acuerdo a los pasos y procedimientos descritos en la sección 7.1.3 en [4].
- *Movilidad*, totalmente compatible con la metodología de evaluación de movilidad de IMT-A, con la diferencia de los escenarios y máximas velocidades para el caso de vehículos de alta velocidad, definiendo los siguientes casos de uso: estacionario 0 km/h, peatonal entre 0 y 10 km/h, vehicular entre 10 y 120 km/h, y vehicular de alta velocidad entre 120 y 500 km/h. Este KPI solo se evalúa para el caso de uso eMBB. En la Tabla 1 se define las clases de movilidad soportados de acuerdo a cada entorno de prueba. Además, se puede ver la eficiencia espectral requerida para cada entorno de prueba considerando que el usuario se encuentra moviéndose a la máxima velocidad permitida en dicho entorno. Los pasos y procedimientos para este KPI están descritos en la sección 7.1.4 en [4].
- *Confiabilidad*, no se encuentra presente en marco de evaluación de IMT-A, y se define como la probabilidad de transmitir con éxito un paquete en un tiempo determinado, de acuerdo a los pasos y procedimientos descritos en la sección 7.1.5 en [4].

Dentro del aproximamiento analítico, se utilizan las instrucciones para el cálculo detallado en [3] de cada parámetro listado en el capítulo 7.2 en [4]. Brevemente mencionamos el cálculo de *eficiencia espectral de pico*, *tasa de datos de pico*, *tasa de datos experimentada por el usuario*, *capacidad de tráfico por área*, *latencia del plano de control*, *latencia del plano de usuario* y *tiempo de interrupción por movilidad*. Es importante que cada uno describe en qué caso de uso y escenario de prueba debe ser calculado, pues existen KPIs que no aplican necesariamente para todos los escenarios o casos.



	<b>Entorno de pruebas para caso de uso eMBB</b>			
	Indoor Hotspot	Dense Urban	Rural	
Tipos de movilidad soportadas	Estacionario, Peatonal	Estacionario, Peatonal, Vehicular (hasta 30 km/h)	Peatonal, Vehicular, y Vehicular de alta velocidad	
Tasa de tráfico de enlace normalizada[bits/s/Hz]	1.5	1.12	0.8	0.45
Movilidad [km/h]	10	30	120	500

Tabla 1. Clases de movilidad soportadas y tasas de tráfico de enlace normalizado en eMBB [3]

Por último, la inspección se realiza mediante la revisión de la funcionalidad y parametrización de la propuesta. En la sección 7.3 en [4] encontramos el listado de dichos parámetros, los cuales son: *ancho de banda, eficiencia energética, soporte de amplio rango de servicios y rango o bandas de espectro soportadas.*

### III.3. ENTORNOS DE PRUEBA Y CONFIGURACIONES DE LA EVALUACIÓN

Los entornos de prueba se han elegido de forma que se modelen las implementaciones típicas y diferentes y se puedan investigar aspectos críticos en el diseño y el rendimiento del sistema, en especial sus límites.

Como se ha mencionado anteriormente, y se encuentra definido en [7], IMT-2020 está concebido para operar basado en tres casos de uso o escenarios de uso, los cuales son:

- *Banda ancha móvil mejorada (eMBB)*, en respuesta a nuevas áreas de aplicación y requerimientos superiores a los alcanzados por la *banda ancha móvil* de IMT-A. Además, brinda una experiencia de usuario mejorada orientada a una mayor QoE. Se aplica en un amplio rango de escenarios diferenciados por sus áreas de cobertura y requerimientos.
- *Comunicaciones masivas de tipo máquina (mMTC)*, caracterizado por una muy elevada densidad de dispositivos conectados que, generalmente, transmiten un volumen bajo de datos y no son sensibles al retardo.
- *Comunicaciones de gran fiabilidad y baja latencia (URLLC)*, con requisitos muy estrictos de latencia, disponibilidad y confianza.

Los entornos de prueba representan un entorno geográfico y responden a un caso de uso.

- *Indoor Hotspot-eMBB*, es un entorno aislado en oficinas o centros comerciales, basado en una alta densidad de usuarios estacionarios o peatones.
- *Dense Urban-eMBB*, es un entorno urbano con elevada densidad de usuarios y carga de tráfico, enfocándose en peatones o usuarios en vehículos.
- *Rural-eMBB*, es un entorno rural con un área de cobertura amplia y continua, dando soporte a peatones y usuarios vehiculares, inclusive a muy alta velocidad.
- *Urban Macro-mMTC*, es un entorno macro urbano enfocándose en cobertura continua a un elevado número de dispositivos tipo máquina conectados.
- *Urban Macro-URLLC*, es un entorno macro urbano enfocándose en comunicaciones de baja latencia y gran fiabilidad.

En cuanto al diseño de red, en los entornos de prueba Dense Urban-eMBB (capa macro), Rural-eMBB, Urban Macro-mMTC y Urban Macro-URLLC, no se consideran detalles topográficos específicos y las estaciones base (BSs – *base station*) se ubican en una malla regular siguiendo un diseño hexagonal, con una configuración de simulación plegada de 19 emplazamientos con tres puntos de transmisión y recepción (TRxP – *transmission reception points*). Este despliegue es el mismo propuesto en el entorno de evaluación de IMT-A. En la Fig. 3 se puede apreciar una estructura hexagonal como la referida, incluyendo el apuntamiento de las antenas (*antenna boresight*), rango de la celda (*cell range*) y distancia entre emplazamientos (ISD – *intersite distance*). Cabe destacar que el ISD cambiará en función del entorno a evaluar.

Los equipos de usuario (UEs – *user equipment*) se distribuyen uniformemente en toda el área.

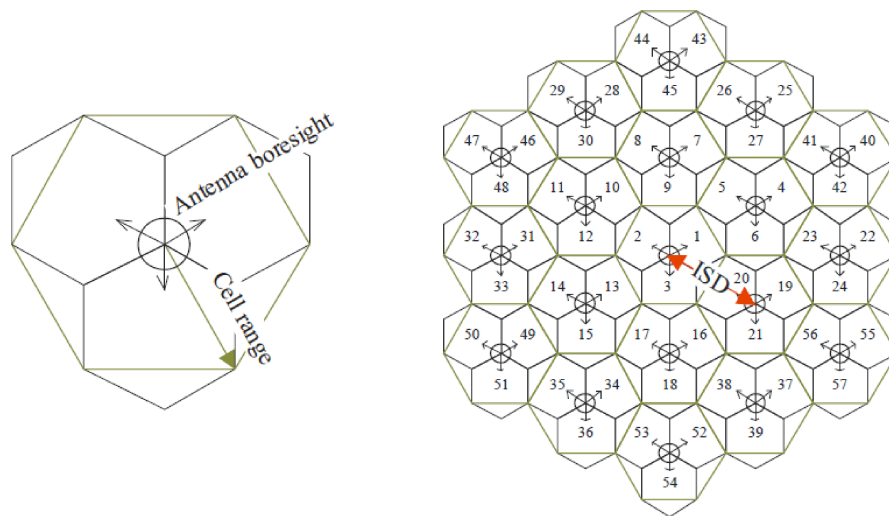


Fig.3. Diseño de red para entornos basados en malla hexagonal [12]

Para el entorno de pruebas Indoor Hotspot-eMBB se considera una planta de un edificio, con una altura de 3 m y una superficie de 120 m de largo por 50 m de ancho. En ese entorno se ubica un total de 12 emplazamientos con un ISD de 20 metros, como se muestra en la Fig. 4. La probabilidad de LoS está definida en el modelo de canal, por lo que no se utilizan paredes internas de manera específica sino indirectamente. Además, se debe definir si se asume 1 o 3 TRxP por emplazamiento.

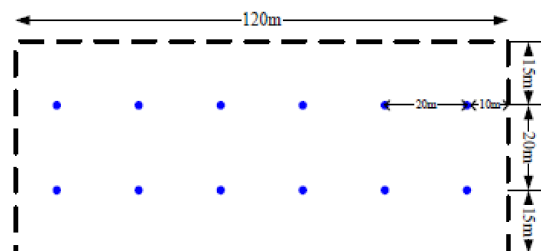


Fig.4. Diseño de red para entornos Indoor Hotspot [4]

El entorno de pruebas Dense Urban-eMBB consiste en dos capas, macro y micro. La capa macro sigue la configuración de malla hexagonal como se vio en la Fig. 3. Para la capa micro se ubican

emplazamientos micro en el área correspondiente a un TRxP macro, como se ve en la Fig. 5. El método de despliegue y número de los emplazamientos micro por cada TRxP macro, así como el número de TRxPs para cada emplazamiento micro, no está definido por lo que debe concretarse por el proponente.

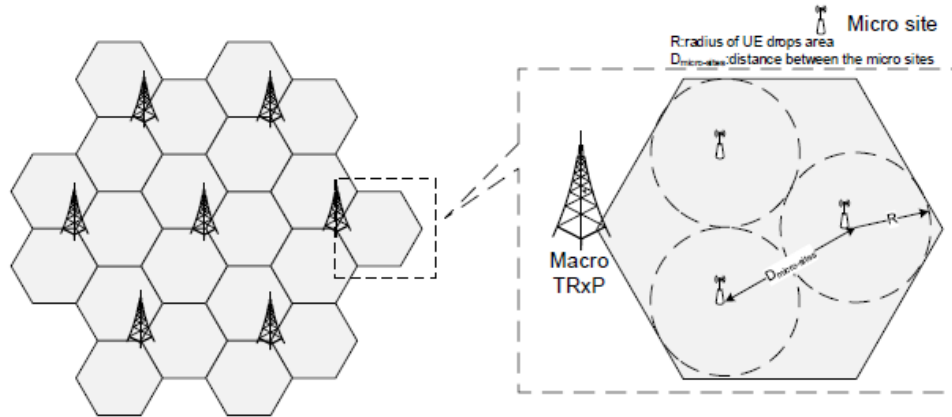


Fig.5. Despliegue de emplazamientos micro para entornos Dense Urban [4]

Los entornos de pruebas Rural-eMBB, Urban Macro-mMTC y Urban Macro-URLLC siguen la configuración de malla hexagonal mostrada en la Fig. 3. Para la evaluación de movilidad a 500 km/h en Rural-eMBB se propone usar la configuración de celdas lineales descrita en el Anexo 2 de [4].

En la sección 8.4 de [4] se definen las configuraciones para evaluación de los entornos descritos anteriormente, que deben ser aplicadas para las evaluaciones analíticas y basadas en simulación. Al existir varias configuraciones por tipo de entorno, es suficiente que se cumplan los requerimientos en una para cada tipo de entorno para dar por cumplida el desempeño técnico de la propuesta. Para Rural-eMBB se debe cumplir la configuración para celdas grandes de baja movilidad (LMLC – *Low mobility large cell*), más una de las otras configuraciones. En las simulaciones a nivel de sistema de IMT-2020, existen dos variantes de modelo de canal, modelo A y modelo B como se describirá posteriormente. Los proponentes pueden seleccionar con qué variante debe ser evaluada su RITs/SRITs para todos los entornos de evaluación. Algunos parámetros se expresan en forma de rango, de manera que se brinde cierta flexibilidad frente a las propuestas que puedan existir y no relacionado con el cumplimiento del valor mayor o menor del rango.

Las características de las antenas que deben ser aplicadas para la evaluación se pueden encontrar en la sección 8.5 de [4]. Podemos destacar en esta sección la introducción de paneles direccionales de antenas para las BSs en todas sus configuraciones y para los UEs para la evaluación a 30 GHz y 70 GHz, mientras que para 4 GHz y 700 MHz se consideran antenas omni-direccionales. Se puede contar con uno o varios paneles de antenas y, a la vez, cada panel tiene uno o varios elementos de antena ubicados de forma vertical, horizontal o en una configuración bidimensional para cada panel. Un panel tiene  $M \times N$  elementos de antena en cada polarización, donde  $M$  es el número de filas y  $N$  es el número de columnas. Los elementos de antena se encuentran ubicados uniformemente separados con un espaciado horizontal y vertical de centro a centro  $d_H$  y  $d_V$ , respectivamente. Cuando una BS

cuenta con varios paneles, se modelan mediante una configuración rectangular de paneles uniformemente distribuidos, como se puede apreciar en la Fig. 6, donde  $M_g$  es el número de paneles en una columna y  $N_g$  es el número de paneles en una fila. Los paneles de antenas se encuentran uniformemente separados con un espaciado horizontal y vertical de centro a centro  $d_{g,H}$  y  $d_{g,V}$ , respectivamente.

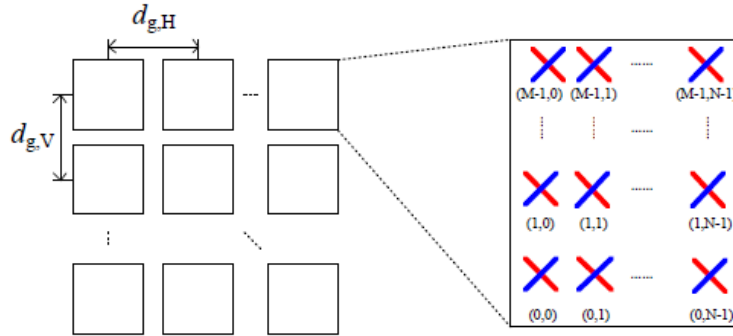


Fig.6. Modelo de antenas para estación base [4]

El proponente y el evaluador deberán reportar la polarización de las antenas ( $P$ ) y los valores de  $M$ ,  $N$ ,  $M_g$ ,  $N_g$ , ( $d_H$ ,  $d_V$ ) y ( $d_{g,H}$ ,  $d_{g,V}$ ).

La orientación de las antenas de BS se definió en la Fig. 3. Cuando el UE cuenta con varios paneles de antenas ( $M_g, N_g$ ), cada panel puede tener diferente orientación. Se introduce entonces los términos  $(\Omega_{m_g, n_g}, \theta_{m_g, n_g})$  como los ángulos de orientación del panel  $(m_g, n_g)$ , donde la orientación del primer panel  $(\Omega_{0,0}, \theta_{0,0})$  es la orientación del UE,  $\Omega_{m_g, n_g}$  es el azimut del panel y  $\theta_{m_g, n_g}$  es el ángulo de inclinación del panel, ambos con respecto a la orientación del UE. En [4] se puede revisar la definición de los patrones de campo tanto para BS, que cuenta con características especiales para el entorno de prueba Indoor Hotspot, y para UE.

#### III.4. MODELADO DE CANAL IMT-2020

Debido a los elevados requerimientos que plantea la 5G en cuanto a tasas de datos, confiabilidad de enlaces, latencias, y un diverso grupo de entornos y casos de uso, se han propuestos importantes novedades tecnológicas, tanto desde la universidad como de la industria. Como se puede ver en el capítulo 4 de [2], los principales cambios tecnológicos a nivel de propagación son, en primer lugar, el uso de nuevas bandas de onda milimétrica por encima de 6 GHz hasta los 100 GHz, las cuales brindan grandes recursos de espectro de frecuencia para aumentar considerablemente el rendimiento de los sistemas 5G. En segundo lugar, la tecnología de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO – *multiple-input multiple-output*) masivas ha recibido mucha atención de la comunidad científica, debido a sus prometedoras capacidades para incrementar la eficiencia espectral y la eficiencia energética, mediante dirección de haces, y la robustez del sistema al equipar a las estaciones base con un gran número de elementos de antenas, típicamente decenas o inclusive cientos. Por último, el

caso de uso mMTC contempla la alta densidad de dispositivos conectados en un área pequeña. Todos estos cambios exigen para su evaluación de un modelo de canal eficiente y preciso.

El modelo de canal espacial (SCM – *spatial channel model*) del 3GPP es el más usado, junto al de WINNER II (Wireless World Initiative New Radio phase II), ambos basados en un modelo de canal estocástico geométrico (GSCM – *geometry-based stochastic channel model*). En la Fig. 7 se puede evidenciar la evolución de la familia de modelos SCM/WINNER II. Con cada evolución se introdujeron nuevas funcionalidades, como el modelado de la variación de tiempo en la extensión de SCM (SCME), el soporte de mayores anchos de banda y más escenarios en WINNER II y los modelos de canal de IMT-A, modelado de propagación en tres dimensiones (3D) en los modelos de canal WINNER+ y 3D-SCM del 3GPP, además del primer soporte para 5G por parte de METIS (*Mobile and Wireless Communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society*). Entre estos modelos, el 3D-SCM del 3GPP ha sido el más popular y ha sido ampliamente utilizado en evaluaciones de sistema. Debido a los requerimientos del estándar New Radio (NR) propuesto por 3GPP, y vistos los nuevos desafíos para los modelos de canal, el propio 3GPP ha desarrollado un modelo de canal específico para NR [13]. Para cubrir los propósitos de evaluación la ITU-R, el grupo de trabajo 5D (WP5D) ha propuesto su modelo de canal para IMT-2020, basado en el esfuerzo de muchas organizaciones, grupos y proyectos, como el 3GPP, METIS, MiWEBA (*Millimetre-wave Evolution for Backhaul and Access*), COST2100, IEEE802.11, la asociación de promoción de 5G en China, etc; y que es la base para la implementación de los cambios en la herramienta de simulación disponible en el GCM.

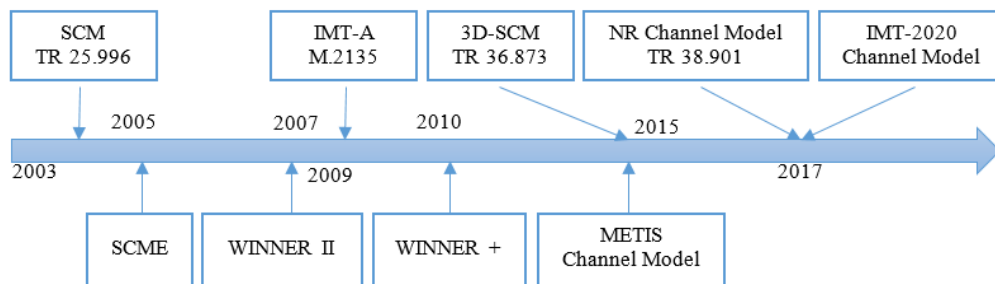


Fig.7. Evolución de la familia de modelos de canal SCM/WINNER II [2]

El modelo de canal para IMT-2020 consiste en un módulo primario, un módulo de extensión y módulo de canal híbrido basado en mapa, siendo los últimos dos opcionales y quedan fuera del presente estudio. El módulo primario brinda parámetros para evaluación de RITs para los entornos de prueba Indoor Hotspot-eMBB, Dense Urban-eMBB, Rural-eMBB, Urban Macro-URLLC, y Urban Macro-mMTC.

El módulo primario sigue un modelo de canal estocástico geométrico, el cual no especifica la ubicación de los puntos de dispersión o *scatterers*, sino que se centra en la dirección de rayos. Los modelos geométricos permiten la separación de los parámetros de propagación y las antenas. Los parámetros individuales de cada instante se determinan de manera estocástica basándose en

distribuciones estadísticas extraídas de las mediciones del canal. El canal resultante se obtiene mediante la aplicación de los principios geométricos, sumando contribuciones de los rayos con parámetros de pequeña escala (SSP – *small scale parameters*) específicos como el retardo, la potencia, el ángulo azimut de salida (AOD – *Angle of departure*) y llegada (AOA – *Angle of arrival*), el ángulo de elevación de salida (ZOD – *Zenith of departure*) y de llegada (ZOA – *Zenith of arrival*). La superposición resulta en la correlación entre los elementos de antena y los desvanecimientos temporales con un espectro Doppler dependiente de la geometría y el tiempo. La Fig. 8 muestra el canal de un solo enlace. Cada círculo con varios puntos representa la región de dispersión causada por un solo clúster. Además, se consideran  $N$  clúster, y cada clúster está conformado por  $M$  rayos. El transmisor Tx y el receptor Rx cuentan con  $S$  y  $U$  elementos de antenas respectivamente. Los SSP se asumen diferentes para cada rayo y normalmente no son variantes en el tiempo.

El procedimiento para calcular la respuesta al impulso del canal se repite para cada enlace entre cada elemento de antena en Tx y Rx. Cuando se cuenta con distribuciones o *arrays* de antenas, el resultado es un canal vector.

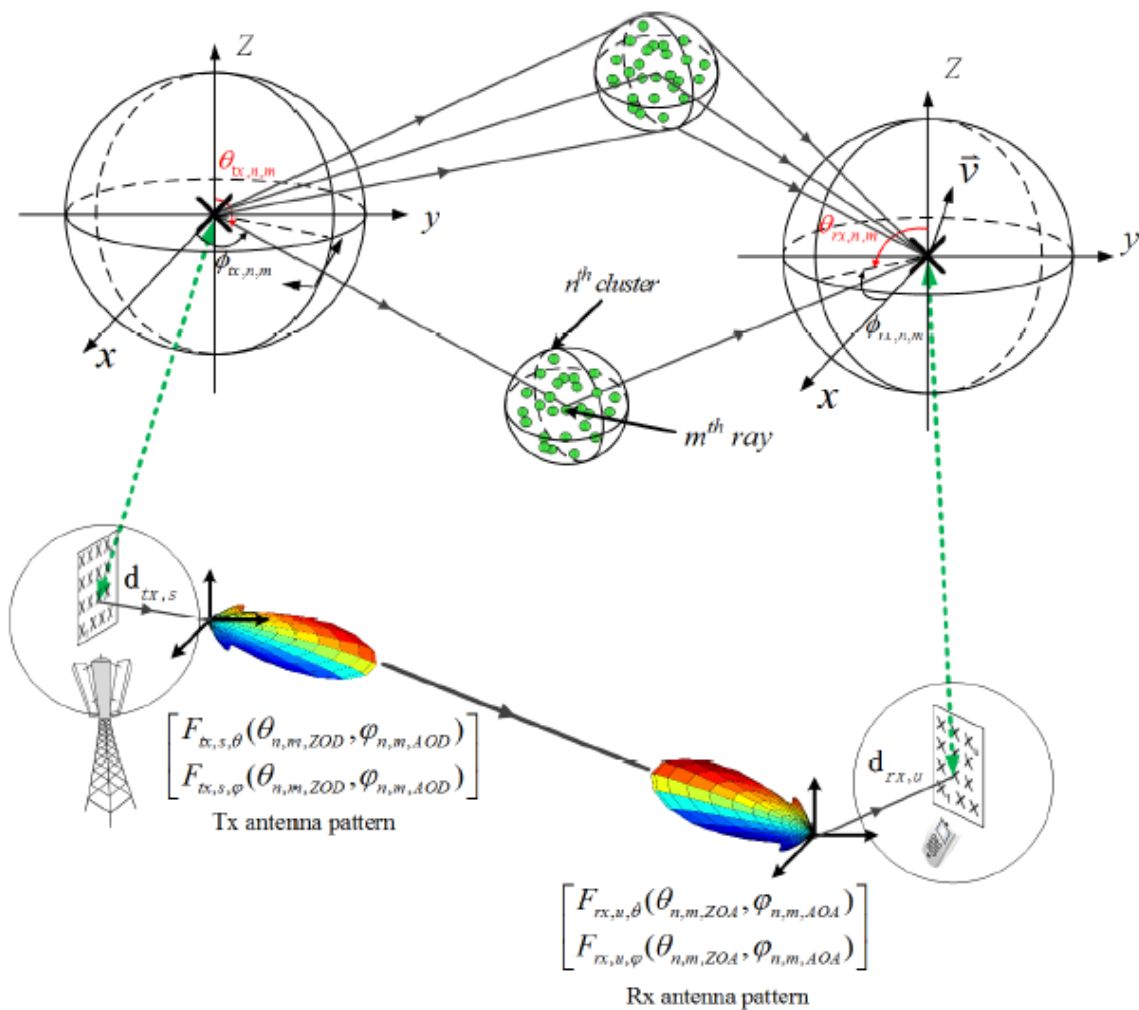


Fig.8. Ilustración del modelo de canal 3D MIMO [4]

La matriz de impulso variante en el tiempo de  $U \times S$  canales MIMO se calcula como:

$$\mathbf{H}(t; \tau) = \sum_{n=1}^N \mathbf{H}_n(t; \tau) \quad (1)$$

Donde:  $t$ : tiempo  
 $\tau$ : retardo  
 $N$ : número de clústeres  
 $n$ : índice de clúster

y está compuesta por las matrices de respuesta del array de antenas  $\mathbf{F}_{tx}$  y  $\mathbf{F}_{rx}$  para el transmisor y el receptor, respectivamente.

El canal desde el elemento de antena del transmisor,  $s$ , al elemento de antena de receptor,  $u$ , para un clúster,  $n$ , se expresa como:

$$\mathbf{H}_{u,s,n,m}(t; \tau) = \sqrt{\frac{P_n}{M}} \sum_{m=1}^M \begin{bmatrix} F_{rx,u,\theta}(\theta_{n,m,ZOA}, \phi_{n,m,AOA}) \\ F_{rx,u,\phi}(\theta_{n,m,ZOA}, \phi_{n,m,AOA}) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \exp(j\Phi_{n,m}^{\theta\theta}) & \sqrt{\kappa_{n,m}^{-1}} \exp(j\Phi_{n,m}^{\theta\phi}) \\ \sqrt{\kappa_{n,m}^{-1}} \exp(j\Phi_{n,m}^{\phi\theta}) & \exp(j\Phi_{n,m}^{\phi\phi}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{tx,s,\theta}(\theta_{n,m,ZOD}, \phi_{n,m,AOD}) \\ F_{tx,s,\phi}(\theta_{n,m,ZOD}, \phi_{n,m,AOD}) \end{bmatrix} \exp(j2\pi\lambda_0^{-1}(r_{rx,n,m}^T \cdot d_{rx,u})) \exp(j2\pi\lambda_0^{-1}(r_{tx,n,m}^T \cdot d_{tx,s})) \exp(j2\pi\nu_{n,m}t) \delta(\tau - \tau_{n,m}) \quad (2)$$

Donde:

$j\Phi_{n,m}^{\theta\theta}, j\Phi_{n,m}^{\theta\phi}, j\Phi_{n,m}^{\phi\theta}, j\Phi_{n,m}^{\phi\phi}$ : fases iniciales aleatorias para cada rayo  $m$ , de cada clúster  $n$ , y para cuatro diferentes combinaciones de las polarizaciones.

$F_{rx,u,\theta}$  y  $F_{rx,u,\phi}$ : patrón de campo del  $u$  elemento de antena del receptor, en la dirección del vector esférico base  $\theta$  y  $\phi$ , respectivamente.

$F_{tx,s,\theta}$  y  $F_{tx,s,\phi}$ : patrón de campo del  $s$  elemento de antena del transmisor, en la dirección del vector esférico base  $\theta$  y  $\phi$ , respectivamente.

$r_{rx,n,m}$  y  $r_{tx,n,m}$ : vector unitario esférico con el ángulo de llegada azimut  $\phi_{n,m,AOA}$  y ángulo de llegada elevación  $\theta_{n,m,ZOA}$  en recepción y ángulo de salida azimut  $\phi_{n,m,AOD}$ , y ángulo de salida elevación  $\theta_{n,m,ZOD}$  en transmisión.

$d_{rx,u}$  y  $d_{tx,s}$ : vector de localización del elemento de antena  $u$  en recepción y el elemento de antena  $s$  en transmisión.

$\kappa_{n,m}$ : ratio de la potencia de polarización cruzada en escala lineal.

$\lambda_0$ : longitud de onda de la frecuencia de portadora.

$\nu_{n,m}$ : componente de frecuencia Doppler del rayo  $n, m$ .

Si el canal radio se modela como dinámico, todos los parámetros de pequeña escala mencionados anteriormente serían variables en el tiempo.

El módulo primario para IMT-2020 incluye el modelo de canal A y el modelo de canal B, ambos basados en mediciones de campo e igualmente válidos para la evaluación de propuestas IMT-2020. Los modelos de canal descritos son InH\_x (Indoor Hotspot), UMa\_x (Urban Macro), UMi\_x (Urban Micro), y RMa\_x (Rural Macro), donde el sufijo “x” implica que puede ser tanto el modelo A o el modelo B. En la Tabla 2 se puede apreciar los modelos de canal correspondientes a cada entorno de prueba.

Entorno de pruebas	Indoor Hotspot - eMBB	Dense urban - eMBB	Rural - eMBB	Urban macro - mMTC	Urban macro - URLLC
Modelo de canal	InH_A, InH_B	Capa Macro: UMa_A, UMa_B Capa Micro: UMi_A, UMi_B	RMa_A, RMa_B	UMa_A, UMa_B	UMa_A, UMa_B

Tabla 2. Modelos de canal de acuerdo al entorno de pruebas [4]

Algunas de las nuevas capacidades del modelo de canal para evaluaciones de IMT-2020 son brevemente descritas a continuación:

- *Modelado 3D*. El modelado 3D describe el canal de propagación tanto en azimut como elevación. Las técnicas de multi-antena capaces de explotar las tres dimensiones serán muy importantes para IMT-2020, por lo que este modelado es indispensable.
- *Consistencia espacial y clústeres*, por un lado, significa que el canal evoluciona sin discontinuidades cuando el Tx o Rx se mueve o gira, y por otro lado, las características de canal deben estar altamente correladas en enlaces cercanos, por ejemplo dos estaciones móviles vistas por la misma estación base [14]. La consistencia espacial considera varios aspectos incluyendo además de los LSP y los SSP, el estado *indoor/outdoor*, la línea de vista *LoS* o *NLoS*, bloqueo y *shadowing*, lo cual facilitará la evaluación de rastreo de haces (*beamtracking*) y MIMO entre múltiples usuarios (MU-MIMO).
- *Gran ancho de banda y arrays masivos de antenas*. Para poder soportar un elevando ancho de banda, el modelo de canal debe tener suficientemente elevada resolución en el dominio angular y de retardo. Además MIMO masivo incluye nuevos aspectos referidos al gran tamaño del array de antenas y el gran número de elementos de antena en el array. Además, diferentes estructuras de antenas pueden afectar la evaluación, como los arrays uniformes lineales (ULA – *uniform linear array*), los arrays uniformes rectangulares (URA – *uniform rectangle array*) y los arrays uniformes cilíndricos (UCA – *uniform cylinder array*).
- *Modelado de Bloqueos*, describe el fenómeno cuando un objeto estacionario o en movimiento entre el trasmisor y los receptores cambia dramáticamente la respuesta del canal por el bloqueo de las señales, especialmente en bandas de frecuencias altas, ya que las ondas milimétricas no penetran o difractan efectivamente en los cuerpos humanos u otros objetos como vehículos. La sombra de estos objetos puede ser un factor importante en las pérdidas del canal o en el tiempo cambiante en el tiempo, además que puede ser importante para la evaluación de tecnologías que incluyan la búsqueda o rastreo de haces.
- *Absorción gaseosa*. La onda electromagnética puede ser parcial o totalmente absorbida por el medio debido a interacciones moleculares y atómicas, por lo que la absorción gaseosa causa pérdidas adicionales en la propagación de la onda de radio, y no puede ser desestimada en las bandas de frecuencia elevada, especialmente aquellas alrededor de 60 GHz.
- *Reflexión en la tierra*. En las ondas milimétricas se ha observado que la reflexión en la tierra produce un efecto de desvanecimiento severo al superponerse con la señal recibida en modo



LoS, por lo que se recomienda la inclusión opcional de esta característica para futuras evaluaciones de IMT-2020.

- *Efectos de la vegetación*, describe como el desvanecimiento provocado por follaje incrementa con la frecuencia, los fenómenos principales son la atenuación de la radiación a través del follaje, la difracción por arriba, abajo y los lados del follaje, y la dispersión difusa en las hojas.
- *Espaciamiento del canal*, se refiere a la definición de un límite inferior de la cantidad de compartimientos de ángulos y retardos, aplicable a ondas milimétricas.
- *Numero aleatorio de clústeres*, permite mediante una distribución de Poisson correctamente configurada producir eventos que incluyan un gran número de clústeres diferentes a los definidos en la literatura.

Cabe mencionar que la absorción por oxígeno, el gran ancho de banda de arrays masivos de antenas, la consistencia espacial, el bloqueo, la frecuencia Doppler variante en el tiempo por trayectos no lineales, la rotación de los terminales de usuario, la reflexión en la tierra, y el número aleatorio de clústeres; son considerados como componentes de modelado Avanzado, y no se han considerado en esta Tesina de Máster para la calibración de canal.

En nuestra implementación, los canales radio se generan usando los parámetros listados en las tablas desde la A1-16 hasta la A1-23 del Anexo 1 de [4]. Las realizaciones de canal generales siguen el procedimiento paso a paso descrito en la Fig. 9 y detallado en el siguiente capítulo. Los modelos de desvanecimiento de canal (*pathloss*) de acuerdo al entorno y rangos de aplicabilidad se encuentran en las tablas A1-2 hasta A1-5 del Anexo 1 de [4]. Además, la distribución de desvanecimiento por sombra (*shadowing*) se modela como log-normal, y la desviación estándar de acuerdo a cada escenario se encuentra descrito en las mismas tablas. El modelo de pérdidas adicionales por penetración de construcciones O-to-I (*outdoor to indoor*), y las pérdidas por penetración en un vehículo, se encuentran descritas respectivamente en la sección 3.2 y 3.3 del Anexo 1 de [4]. El estado del enlace LoS o NLoS se asigna de acuerdo a un modelo probabilístico, detallado de acuerdo a cada entorno en la tabla A1-9 del Anexo 1 de [4]. Es importante señalar que la generación de coeficientes de canal para el caso de LOS O-to-I sigue el mismo método que para el caso NLOS.

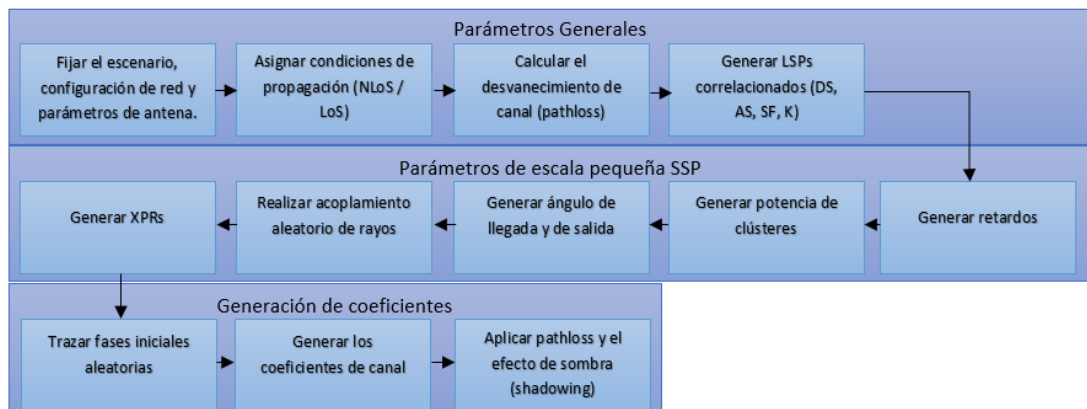


Fig.9. Procedimiento general para generación de coeficientes de canal [4]

Debe notarse, además, que la descripción geométrica cubre los ángulos de llegada del rebote en el último dispersor y el respectivo ángulo de salida hacia el primer dispersor que interactúa del lado del transmisor. La interacción entre el primer y el último dispersor no está definida. Por lo tanto, este modelo permite varias interacciones con los dispersores del medio. Además, el retardo aportado por las múltiples interacciones no puede ser determinado por la geometría.

De igual manera se define un sistema de coordenadas global en los ejes  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , mostrado en la Fig. 10, donde se puede ver la definición del ángulo zénit  $\theta$ , y el ángulo azimut  $\phi$  en el sistema de coordenadas cartesianas. Notar que  $\theta = 0^\circ$  apunta al zénit, y  $\theta = 90^\circ$  apunta al horizonte,  $\phi = 0^\circ$  apunta en la dirección del eje  $x$ , y un valor positivo avanza contra las manecillas del reloj.

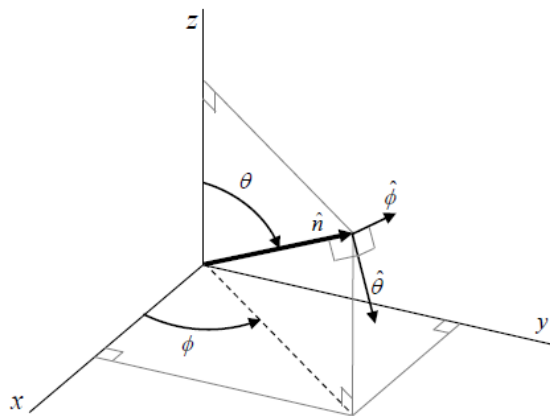


Fig.10. Definición del sistema de coordenadas global [4]

A pesar de que los modelos de canal NR del 3GPP e IMT-2020 de la ITU-R son muy similares, no son idénticos. Las diferencias se pueden encontrar en la generación de los modelos de penetración O-to-I, puesto que mientras NR dicta que se debe realizar un modelado por enlace, IMT-2020 lo hace por UE. Es necesario tender a un solo sistema de modelado, y ya que ambos son una evolución de 3D-SCM, posiblemente lo correcto sería que se mantenga la tendencia de NR. Un esfuerzo adicional requerirá continuar ampliando la caracterización de los modelos de canal, en especial en la operación entre 6 GHz y 100 GHz. 5G seguirá creciendo y generando nuevos casos de uso, lo que suscitará la necesidad de generar nuevas prestaciones de los modelos de canal para poder evaluar las propuestas.

#### IV. IMPLEMENTACIÓN

El GCM del iTEAM de la UPV cuenta con un programa propietario de simulación desarrollado en C++ que fue ya utilizado con éxito en la evaluación de IMT-A [8].

Para poder implementar la actualización de dicho programa es necesario estudiar el nuevo marco de evaluación para IMT-2020 como se ha hecho en el capítulo anterior, y obtener una relación entre la estructura del procedimiento presente en IMT-A e IMT-2020. Se debe recordar que esta tesina ha permitido la agregación de los modelos de canal requeridos en las simulaciones para la evaluación de IMT-2020, centrándonos en las suposiciones propuestas por el 3GPP para evaluar su nuevo estándar NR, es decir, la simulación a nivel de sistema. Para poder completar la calibración de canal,

los procedimientos requeridos en el nivel de enlace de la herramienta de simulación han sido implementados por el autor principal del desarrollo de la segunda versión del programa propietario de simulación del GCM y el director experimental de esta tesina [8].

A continuación, esta sección arranca con la descripción del entorno de desarrollo para la programación de la aplicación, proseguiremos con la comparación de los pasos para la generación de realizaciones de canal a nivel de sistema junto con la descripción de los cambios requeridos para cada uno, y terminaremos indicando el procedimiento completado para poder realizar la calibración de canal.

#### IV.1. ENTORNO DE DESARROLLO

El programa de simulación se encuentra desarrollado en C++, para lo cual nos hemos basado en un sistema basado en *ubuntu 16.04 LTS*. Un entorno de desarrollo integrado *Eclipse IDE for C/C++ Developers, Version: Oxygen.3a Release (4.7.3a)*. Además, se ha trabajado con un SVN (*Subversion*) Subclipse, que ha permitido contar con un repositorio de trabajo compartido que almacene diferentes versiones de la aplicación, y desarrollo colaborativo de los miembros autorizados.

El proyecto se encuentra estructurado mediante tres carpetas principales. *headers* contiene los archivos de extensión *.h*, *src* contiene los archivos de extensión *.cpp*, y *configurations\_calibration\_imt2020* contiene los scripts para completar diferentes tareas, e ingresar configuraciones al sistema, aunque esta última no es indispensable para la compilación. Además, el compilador se encuentra configurado para generar versiones *Release* del ejecutable que optimizan su ejecución, y versiones *Debug* que permiten depurar el programa en búsqueda y detección de errores.

Mediante *bash scripts* se coordina la ejecución del programa con varias fuentes de aleatoriedad (*Seed*) y configuraciones del entorno de prueba, que proveen resultados de los enlaces generados en la simulación.

Para la tabulación y traducción de los resultados, que permitan obtener información, en nuestro caso, útil para la calibración de canal, se ha usado Matlab, para generar las curvas CDF (*funciones de distribución acumulada*) descritas posteriormente en los resultados.

#### IV.2. PROGRAMACIÓN NIVEL SISTEMA PARA LA EVALUACIÓN IMT-2020

Las simulaciones principales de nivel de sistema en el marco de evaluación para IMT-2020 desarrollado por la ITU-R siguen el procedimiento detallado en los capítulos 3 y 4 del Anexo 1 de [4], como ha sido descrito en el capítulo anterior de esta tesina. De ahora en adelante nos referiremos a él cuando sea necesario como *modelo de desvanecimiento rápido IMT-2020*.

Las realizaciones de canal generales siguen el procedimiento paso a paso descrito en la Fig. 9. Esta figura representa bien la estructura principal que debe contener el programa de simulación. La experiencia adquirida durante la evaluación de IMT-A, que ocupa un modelo de canal basado en el modelo SCM de IST-WINNER II descrito en el Anexo 1 de [12], nos permiten plantear la posibilidad

de partir de dicho simulador para la implementación llevada a cabo en esta tesina, pues los pasos requeridos para la generación de coeficientes de canal poseen una gran similitud con el modelo de canal para IMT-2020, que es una evolución del modelo SCM-3D y NR del 3GPP, como se pudo ver en la Fig. 7.

Podemos entonces asegurar que los pasos a seguir descritos en la Figura 9 del Anexo 1 de [12] son idénticos a los pasos requeridos para el marco de evaluación de IMT-2020 descritos a lo largo de esta tesina. Cabe destacar que, en dicho gráfico, el paso referido a la generación de XPRs (*cross polarization ratio*) no existe, sin embargo está citado en la generación de coeficientes de canal en el paso 10a, y fue el método utilizado en la implementación del simulador para IMT-A.

Dicho esto, a continuación describimos cada uno de los pasos del modelo de desvanecimiento rápido del marco de evaluación para IMT-2020 y las modificaciones o adaptaciones realizadas en el programa propietario de simulación del GCM para la evaluación de IMT-A. Destacar que, de momento, el programa ha sido generado de manera que pueda ejecutar las simulaciones de nivel de sistema tanto para IMT-A como para IMT-2020. Recordemos, además, que la ITU-R en la sección 8.4 de [4] define las configuraciones para evaluación de los entornos de prueba que deben ser aplicados para las evaluaciones basadas en simulación y cuando sea necesario se las referirá como *configuraciones IMT-2020*. Por su parte, las suposiciones de la propuesta preliminar del estándar propuesto por el 3GPP disponibles en [9] son de suma importancia para esta implementación, y de ahora en adelante nos referiremos a ellas como *suposiciones del 3GPP* cuando sea necesario. De igual manera, los parámetros de desvanecimiento rápido listados en las tablas desde la A1-16 hasta la A1-23 del Anexo 1 de [4] se han utilizado para la generación de diversos parámetros de canal, y de ahora en adelante serán referidos como *parámetros IMT-2020*.

**IMPORTANTE:** Todas las ecuaciones y tablas referidas en los siguientes pasos pertenecen al *modelo de desvanecimiento rápido IMT-2020*, a menos que sea especificado lo contrario explícitamente.

Arrancamos con la generación de parámetros generales.

*Paso 1.-* Fijar el escenario, diseño de red y parámetros de antena.

- Definir el escenario y escoger un sistema de coordenadas global. Para esto hemos añadido los nuevos escenarios que responden a los distintos casos de uso, como se vio en la Tabla 2. El origen del sistema de coordenadas global se encuentra definido en la base del emplazamiento que contiene las primeras tres celdas, en el caso de los entornos basados en malla hexagonal como en la Fig. 3, o en el centro de la planta rectangular para los sistemas *Indoor Hotspot* como se ve en la Fig. 4. Cabe mencionar que el origen del eje Z es el nivel del suelo.
- Definir el número de BS y UE y darles una ubicación 3D, para posterior definición de los ángulos LoS AOA, LoS AOD, LoS ZOA, LoS ZOD, entre cada BS y UE en el sistema de coordenadas global. La creación y distribución de las BS y los UE responde a las

configuraciones respectivas para cada escenario descritos en el apartado III.3 de esta tesina y las *suposiciones del 3GPP*. En cuanto al sistema de coordenadas global en 3 dimensiones de la Fig. 10, la aplicación ya implementa un sistema que ubica cada uno de los elementos del diseño de red en coordenadas cartesianas espaciales de 3D, por lo que la determinación de distancias, ángulos y vectores de dirección de cada enlace se puede derivar de los mismos, como se muestra en la Fig. 11. Es importante recalcar que para el entorno de pruebas *Dense Urban – eMBB* la altura de los UE depende del estado *indoor/outdoor* de los mismos, como se detalla en la sección 3.1 del Anexo 1 de [4], por lo que el orden de ejecución de los cálculos dentro de la aplicación puede no ser en el orden propuesto dentro de estos pasos. Además, la determinación de los ángulos de elevación que parten desde el Zenit se implementó de manera específica en esta Tesina de Máster.

- Definir el patrón de campo  $F_{rx}$  y  $F_{tx}$  para cada BS y UE respectivamente en el sistema global de coordenadas y para la geometría concreta del array de antenas, siguiendo las configuraciones provistas por el proponente en las *suposiciones del 3GPP*. La implementación de los arrays de antena ha sido realizada de manera general y cubre cada uno de los nuevos escenarios disponibles en IMT-2020 tanto para las BSs como para los UEs, de manera que se posee un vector que almacena la ubicación espacial de cada elemento de antena y su respectiva polarización, además de definir su patrón de campo. Recordemos que las antenas de los UE poseen un patrón de campo Omni-direccional únicamente en las configuraciones con frecuencias inferiores a los 6GHz.
- Dar orientación a los BS y UE con respecto al sistema de coordenadas globales y dar velocidad y dirección de movimiento de los UE en el sistema global. De igual manera se implementaron los nuevos escenarios siguiendo las configuraciones provistas por el proponente en las *suposiciones del 3GPP*, se incluyeron los modelos de movilidad oportunos. Se evidencia que en varias configuraciones de los distintos escenarios la velocidad de los UE depende del estado *indoor/outdoor* de los mismos, por lo que el orden de ejecución de esta asignación dentro de la aplicación puede no ser el orden propuesto dentro de estos pasos.
- Por último, fijar la frecuencia central y el ancho de banda. Para este paso no fue requerida ninguna modificación.

Si el modelo requiere del uso de diseño plegado (*wrapping*) cada copia de BS debe ser considerado como una BS diferente, en lo concerniente a la generación del canal.

Los procedimientos necesarios para la generación de parámetros generales se concentran en los archivos de código fuente C++ y su encabezados *configuration.cpp* encargado del ingreso de parámetros relacionados a las configuraciones presentes en los archivos XML, mediante la provisión de métodos de creación, lectura o escritura de objetos, además de la creación y distribución de los BS de acuerdo al diseño de red. Además, *location.cpp* es el encargado de la creación y distribución

de los UE de acuerdo al diseño de red, configura la velocidad y dirección de movimiento a los UE, mientras que *channel.cpp* se encarga de la configuración de los parámetros de las antenas apoyándose en los métodos de *configurations.cpp* y, además, configura el modelo de canal a ser usado y realiza el cálculo de las posiciones relativas de cada UE con respecto a cada BS, parámetro usado para determinar las características geométricas del enlace. Por último, *channel\_IMTA.cpp* es el encargado del cálculo de los ángulos de cada enlace y de lanzar la creación de las instancias de LSPs y SSPs parada cada enlace.

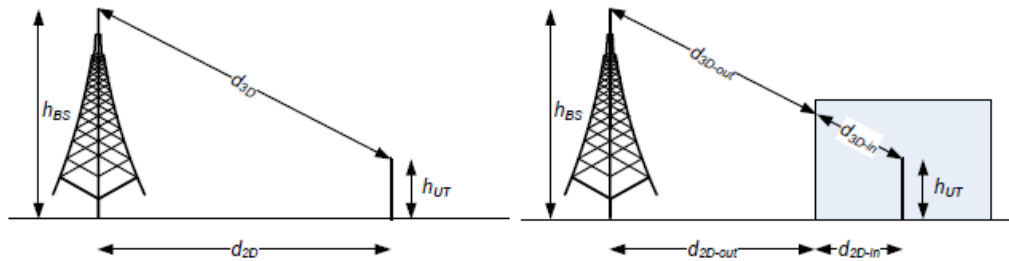


Fig.11. Definiciones de distancias por enlace [4]

Una vez definido el diseño de la red, podemos continuar con la generación de los parámetros de gran escala (LSP – *large scale parameters*).

*Paso 2.-* Asignar condiciones de propagación (*NLoS/LoS*) de acuerdo a la tabla A1-9 en el Anexo 1 de [4]. Las condiciones de propagación de diferentes enlaces no están relacionadas, por lo que son independientes. Asignar también el estado *indoor/outdoor* para cada UE de acuerdo a las *configuraciones IMT-2020* y las *suposiciones del 3GPP*. Es importante notar que todos los enlaces de un solo UE tienen el mismo estado *indoor/outdoor*. Además, ciertos usuarios en estado *outdoor* pueden encontrarse en vehículos, por lo que se aumenta la definición del estado *inCar*. La implementación se ha generado para los nuevos escenarios realizando una distribución uniforme para todos los elementos.

*Paso3.-* Calcular las pérdidas de propagación (*pathloss*) usando las fórmulas presentes en las tablas de la A1-2 hasta A1-5 del Anexo 1 de [4]. Para su implementación se han implementado todas las fórmulas clasificadas de acuerdo al entorno de pruebas, variante de modelo de canal, condición de propagación y, en caso del modelo A, frecuencia de la banda evaluada. Los rangos máximos y mínimos de la distancia del enlace y la frecuencia también son controlados en este apartado. Los rangos permiten que el sistema de evaluación presente cierta flexibilidad frente a las propuestas que puedan ser implementadas. En este punto la descripción de la Fig. 11 es importante, puesto que referencia la relación existente entre la distancia 2D usada para definir los rangos y la distancia 3D que permite el cálculo del *pathloss*.

Además, se ha incluido el cálculo de pérdidas adicionales debido a la penetración de edificios en enlaces O-to-I (*Outdoor-to-Indoor*) y usuarios en un vehículo (*inCar*), como se encuentra descrito en la sección 3.2 y 3.3 de [4] respectivamente, aplicable para todos los entornos de prueba excepto *Indoor Hotspot*. La generación de la distancia *indoor*, que provoca pérdidas adicionales, también se

encuentra descrita en esta sección y se genera de acuerdo al escenario y a la variante del modelo de canal con una variabilidad aleatoria uniforme. Además, de acuerdo a las *configuraciones IMT-2020* y las *suposiciones del 3GPP*, se realiza una distribución uniforme de los usuarios *indoor* considerando modelos de pérdidas por penetración en materiales de bajas pérdidas y altas pérdidas. Es necesario notar que, a diferencia del modelo NR del 3GPP, el modelo IMT-2020 de la ITU-R genera la distancia *indoor* por UE y no por enlace. Además, una distribución realista de las caracterizaciones de los materiales que producen altas pérdidas depende de la sociedad y el nivel económico del país en el que se haga el estudio, especialmente dependiente del uso de vidrios recubiertos de metal, por lo que el proponente de la tecnología podría definir variaciones en esta distribución.

*Paso 4.-* Se generan los parámetros de gran escala, como son la dispersión de retardo (DS), dispersión de ángulos (ASA, ASD, ZSA, ZSD), Factor k de Ricean (K), y dispersión por sombra (SF), teniendo en cuenta las correlaciones cruzadas de los *parámetros IMT-2020*, y usando el procedimiento descrito en la sección 3.3 de los modelos de canal WINNER II con la raíz cuadrada de la matriz de correlación cruzada  $\sqrt{C_{M \times M}(0)}$ . Se implementaron las funciones para rellenar el vector de LSP  $sM = [sDS, sASD, sASA, sSF, sK, sZSA, sZSD]^T$  siguiendo el orden en que se encuentran presentados en los *parámetros IMT2020*. Se debe notar que a diferencia de los modelos para IMT-A que poseían 5 parámetros LSP, ahora poseemos 7 parámetros LSP debido a la presencia de la dispersión en los ángulos de elevación. Esto es un factor importante que ha sido definido y controlado en la aplicación, y que permite la elección de los procedimientos adecuados para la tecnología simulada. Además, se ha implementado la limitación aleatoria RMS para dispersión del ángulo de azimut en 104 grados, y para dispersión del ángulo de zenit en 52 grados.

Los procedimientos necesarios para la generación de parámetros de gran escala se concentran en los archivos de código fuente C++ y su encabezados *configuration.cpp*. *location.cpp* provee los métodos relacionados a la distribución de UE en condición *indoor/outdoor*, además de la distribución de tipo de pérdidas provocadas por penetración y generación de las distancias *indoor*. *channel\_IMTA\_LSP.cpp* provee los métodos para la generación de condiciones de propagación *LoS/NLoS* para cada enlace, lanza el cálculo del *pathloss* que incorpora las pérdidas generadas por la penetración de edificios, e incorpora la configuración de los parámetros LSP de acuerdo a cada escenario, y generación de la matriz de LSPs con correlación cruzada necesaria para la generación de los parámetros de canal SSP. Finalmente, *channel\_IMTA\_pathloss.cpp* incorpora todas las fórmulas para el cálculo de las pérdidas de propagación de acuerdo a cada entorno de prueba, condición de propagación y diseño de red.

A continuación, se procede con la generación de parámetros de escala pequeña (SSP – *small scale parameters*).

*Paso 5.-* Generar los retardos  $\tau_n$ . Los retardos son generados de acuerdo a la distribución de retardos disponible en los *parámetros IMT-2020*, que en este caso es siempre exponencial, y se

escalán mediante el factor de proporcionalidad de distribución de retardo, definido por entorno de prueba y condición de propagación. Se generan retardos por cada clúster usando una distribución uniforme, y se normalizan restando el menor retardo generado. Por último, se ordenan de manera ascendente, como se ve en las ecuaciones (5) y (6).

En caso de la condición de propagación LoS, se requiere un escalado adicional para compensar el efecto de adición pico a la dispersión del retardo provocado por la condición LoS. Para esto se utiliza la constante de escalado basada en el Factor K de Rician, y se aplican de acuerdo a las ecuaciones (7) y (8). Estos retardos escalados NO deben ser utilizados para la generación de potencia de clúster, por lo que se los implementa guardándolos en variables diferentes. La implementación de IMT-A sigue el mismo procedimiento, por lo que la implementación responde la incorporación de los parámetros específicos de IMT-2020 y los nuevos escenarios.

*Paso 6.-* Generación de potencia de clúster  $P_n$ . La potencia de los clústeres se calcula asumiendo una curva exponencial de retardo de potencia de una sola pendiente, y basándose en el valor de la distribución normal por *shadowing* por clúster que se encuentra en *parámetros IMT-2020*. Después, se normaliza las potencias, de manera que la suma de todas de un total de 1, de acuerdo a las ecuaciones (9) y (10).

En caso de que la condición de propagación sea LoS, se añade una componente especular al primer clúster (11), y la potencia de los clústeres no se calcula como en la ecuación (10), sino que se utiliza la ecuación (12). Estos valores de potencia se utilizarán posteriormente en las ecuaciones (13) y (18) pero no en (27). Después, se procede a asignar la proporción de potencia para cada rayo del clúster. Por último, se eliminan los clústeres con más de 25 dB de potencia menos que el clúster de mayor potencia, sin que esto requiera modificar nuevamente el factor de escalado.

*Paso 7.-* Generación de ángulos de salida y llegada tanto para azimut como para elevación. La generación de ángulos de azimut puede seguir un modelado Gausiano o Laplaciano de acuerdo a los *parámetros IMT-2020*. De acuerdo a esto, para la generación de los ángulos de llegada en azimut AOA se sigue las ecuaciones (13a) o (13b) usando como parámetros la  $P_n$  y la dispersión del ángulo de llegada (ASA) RMS calculados en pasos anteriores, y con  $C_\phi$  definido en las ecuaciones (14a) o (14b), respectivamente, de acuerdo a la condición de propagación, donde  $C_\phi^{NLOS}$  es un factor de escalado relativo al número de clústeres y sus valores están dados en la Tabla A1-11. Además, se precisa de un escalado adicional en el caso de LoS. Se asigna signo positivo o negativo al ángulo mediante una variable aleatoria de distribución uniforme y una componente aleatoria de distribución normal entre 0 y  $ASA/7$ , como se ve en la ecuación (15), donde  $\phi_{AOA,LOS}$  es el ángulo azimut definido en el diseño de red de pasos anteriores. En caso de LoS, se hace uso de la ecuación (16) en lugar de la (15) para obligar al primer clúster a confinarse en la dirección LoS. Finalmente, se agregan los offset para cada rayo de cada clúster de acuerdo a la ecuación (17) y los valores presentes en la Tabla A1-12 y en los *parámetros IMT-2020*. La generación de los ángulos azimut de salida AOD sigue el mismo procedimiento descrito anteriormente con el cambio de parámetros respectivos.



La generación de los ángulos de llegada en elevación en la dimensión del zenit ZOA sigue siempre un modelo Laplaciano, de acuerdo a la ecuación (18), usando como parámetros la  $P_n$  y la dispersión del ángulo de llegada (ZSA) RMS calculados en pasos anteriores, y con  $C_\theta$  definido de acuerdo a la variante modelo de canal en las ecuaciones (19) y (20) y tablas A1-13 y A1-14 para modelo A y modelo B, respectivamente. Además, de nuevo se requiere de un escalado adicional en el caso de LoS. Se asigna signo positivo o negativo al ángulo mediante una variable aleatoria de distribución uniforme y una componente aleatoria de distribución normal entre 0 y  $ZSA/7$ , como se ve en la ecuación (21), donde  $\theta_{ZOA}$  es 90 grados en el caso de enlaces con condición O-to-I o, en caso contrario, es igual a  $\theta_{ZOA,LOS}$ , que es el ángulo zenit definido en el diseño de red en pasos anteriores. En caso de LoS, se hace uso de la ecuación (22) en lugar de la (21) para obligar al primer clúster a situarse en la dirección LoS. Finalmente, se agregan los offset para cada rayo de cada clúster de acuerdo a la ecuación (23) y los valores presentes en la Tabla A1-12 y en los *parámetros IMT-2020*. Asumiendo que  $\theta_{n,m,ZOA}$  se encuentra generada entre 0 y 360 grados, en caso que  $\theta_{n,m,ZOA}$  sea mayor que 180 grados, entonces se define  $\theta_{n,m,ZOA}$  como  $360 - \theta_{n,m,ZOA}$ . La generación de los ángulos zenit de salida ZOD sigue el mismo procedimiento descrito anteriormente con el cambio de parámetros respectivos y el uso de la ecuación (24) en lugar de la ecuación (21) y la ecuación (25) en lugar de la ecuación (23). En caso de LoS, la generación de ZOD sigue el mismo procedimiento descrito para ZOA usando la ecuación (22).

Estos pasos ya se encontraban implementados en el programa de simulación y son equivalentes para la generación de ángulos de azimut de salida y llegada, siempre y cuando se use los *parámetros IMT-2020* correspondientes. Para la generación de los ángulos de elevación o zenit tanto de salida como de llegada fue necesario implementar todos los pasos y ecuaciones correspondientes, siendo la agregación del offset implementada anteriormente válida para todos los ángulos generados. Además, se ha agregado un control para colocar un valor estático en los ángulos de elevación en caso de tratarse de una simulación de IMT-A que permita la depuración de errores.

*Paso 8.-* Acoplamiento de rayos en un clúster tanto para azimut como para elevación. Se acopla de manera aleatoria los ángulos de salida en azimut con los ángulos de llegada en azimut en cada clúster, o sub-clúster, en caso de existir. De igual manera, se acopla de manera aleatoria los ángulos de salida en zenit con los ángulos de llegada en azimut en cada clúster, o sub-clúster. Por último, se acopla de manera aleatoria los ángulos de salida en azimut con los ángulos de salida en zenit en cada clúster, o sub-clúster. La implementación ha requerido la replicación de procedimientos para los últimos dos acoples.

*Paso 9.-* Generación de los ratios de polarización cruzada de potencia (XPS – *Cross polarization power ratio*)  $\kappa$  para cada rayo de cada clúster, con una distribución log-normal como se ve en la ecuación (26), donde los parámetros en la generación de la distribución se encuentran en los *parámetros de IMT-2020*.

Los procedimientos necesarios para la generación de parámetros de pequeña escala se concentran en los archivos de código fuente C++ y su encabezados *channel\_IMTA\_SSP.cpp*, que incorpora la implementación de todos los procedimientos y fórmulas descritos anteriormente.

A continuación, se procede con la generación de los coeficientes de canal.

*Paso 10.-* Generar las fases aleatorias iniciales. Se generan las fases iniciales  $\Phi_{n,m}^{\theta\theta}$ ,  $\Phi_{n,m}^{\theta\varphi}$ ,  $\Phi_{n,m}^{\varphi\theta}$ ,  $\Phi_{n,m}^{\varphi\varphi}$ , para cada rayo  $m$  de cada clúster  $n$ , y para cuatro diferentes combinaciones de polarizaciones  $(\theta\theta, \theta\varphi, \varphi\theta, \varphi\varphi)$ , con una distribución es uniforme y con variación entre -180 y 180 grados. En el caso de LoS, en caso que  $\Phi_{LOS}$  es escogida como aleatoria, generar las bases aleatorias para ambas polarizaciones  $\theta\theta, \varphi\varphi$ . La implementación de este paso es idéntica a las de IMT-A por lo que no se ha requerido ningún cambio.

*Paso 11.-* Generar los coeficientes de canal para cada clúster  $n$ , y cada par de elementos de recepción y transmisión  $u, s$ .

En el caso de existir más de dos clústeres, los coeficientes de canal para los N-2 clústeres más débiles se generan usando la ecuación (27), que fue detallada mediante la ecuación (2) de la sección III.4 de esta tesina.

Los vectores esféricos unitarios  $r_{rx,n,m}$  y  $r_{tx,n,m}$  se calculan en base a las ecuaciones (28) y (29) respectivamente. El componente de frecuencia Doppler se calculado de acuerdo a la ecuación (30) y depende de los ángulos de llegada AOA y ZOA y del vector de velocidad V, con módulo y dirección. Todos parámetros de pequeña escala usados en la generación de coeficientes de canal han sido calculados en los pasos anteriores. Para los dos clústeres más fuertes, sus rayos se dispersan en retardo en tres sub-clústeres por cada clúster, con un retardo fijo y expresado en la ecuación (31), donde  $C_{DS}$  es la dispersión en retardo del sub-clúster especificado en los *parámetros IMT-2020*. Cuando este valor no se encuentra disponible, por ejemplo, para generalizarlo con IMT-A, se usa el valor de 3.91 ns. De esta manera podremos obtener los retardos de 5 ns y 10 ns que se mencionaban anteriormente. Los 20 rayos del clúster son mapeados en sub-clústeres de acuerdo a la Tabla A1-15. Estos rayos se deben encontrar aplicando la dispersión angular de la Tabla 1-12. De esta manera, la respuesta de impulso de canal se formula como en (32), que no es nada más que la sumatoria de los coeficientes generados por los sub-clústeres de los dos clústeres más fuertes, más el sumatorio los coeficientes generados por el resto de clústeres y que son calculados a través de (33).

$$H_{u,s}^{NLOS}(\tau, t) = \sum_{n=1}^2 \sum_{i=1}^3 \sum_{m \in R_i} H_{u,s,n,m}^{NLOS}(t) \delta(\tau - \tau_{n,i}) + \sum_{n=3}^N H_{u,s,n}^{NLOS}(t) \delta(\tau - \tau_n) \quad (32) [4]$$

$$H_{u,s,n,m}^{NLOS}(t) = \sqrt{\frac{P_n}{M}} \begin{bmatrix} F_{rx,u,\theta}(\theta_{n,m,ZOA}, \varphi_{n,m,AOA}) \\ F_{rx,u,\varphi}(\theta_{n,m,ZOA}, \varphi_{n,m,AOA}) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \exp(j\Phi_{n,m}^{\theta\theta}) & \sqrt{\kappa_{n,m}^{-1}} \exp(j\Phi_{n,m}^{\theta\varphi}) \\ \sqrt{\kappa_{n,m}^{-1}} \exp(j\Phi_{n,m}^{\varphi\theta}) & \exp(j\Phi_{n,m}^{\varphi\varphi}) \end{bmatrix} \quad (33) [4]$$

$$\begin{bmatrix} F_{tx,s,\theta}(\theta_{n,m,ZOD}, \varphi_{n,m,AOD}) \\ F_{tx,s,\varphi}(\theta_{n,m,ZOD}, \varphi_{n,m,AOD}) \end{bmatrix} \exp\left(j2\pi \frac{\hat{r}_{rx,n,m}^T \cdot \bar{d}_{rx,u}}{\lambda_0}\right) \exp\left(j2\pi \frac{\hat{r}_{tx,n,m}^T \cdot \bar{d}_{tx,s}}{\lambda_0}\right) \exp\left(j2\pi \frac{\hat{r}_{rx,n,m}^T \cdot \bar{v}}{\lambda_0} t\right)$$

En el caso de LOS, se determina el coeficiente de canal LOS a través de (34)

$$\begin{aligned}
H_{u,s,1}^{\text{LOS}}(t) = & \begin{bmatrix} F_{rx,u,\theta}(\theta_{\text{LOS,ZOA}}, \varphi_{\text{LOS,AOA}}) \\ F_{rx,u,\phi}(\theta_{\text{LOS,ZOA}}, \varphi_{\text{LOS,AOA}}) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{tx,s,\theta}(\theta_{\text{LOS,ZOD}}, \varphi_{\text{LOS,AOD}}) \\ F_{tx,s,\phi}(\theta_{\text{LOS,ZOD}}, \varphi_{\text{LOS,AOD}}) \end{bmatrix} \\
& \cdot \exp(j\Phi_{\text{LOS}}) \exp\left(j2\pi \frac{\hat{\mathbf{r}}_{rx,\text{LOS}}^T \cdot \bar{\mathbf{d}}_{rx,u}}{\lambda_0}\right) \exp\left(j2\pi \frac{\hat{\mathbf{r}}_{tx,\text{LOS}}^T \cdot \bar{\mathbf{d}}_{tx,s}}{\lambda_0}\right) \exp\left(j2\pi \frac{\hat{\mathbf{r}}_{rx,\text{LOS}}^T \cdot \bar{\mathbf{v}}}{\lambda_0} t\right)
\end{aligned} \quad (34) [4]$$

$\Phi_{\text{LOS}}$  es la fase inicial de camino LOS y puede ser aleatoria o determinada a través de la distancia de acuerdo a  $\Phi_{\text{LOS}} = -2\pi \frac{d_{3D}}{\lambda_0}$ . Para el Modelo B siempre será determinada de acuerdo a la distancia.

Después, para calcular la respuesta de canal, se agrega el coeficiente de canal LOS a los coeficientes de canal NLOS escalando ambos términos de acuerdo al factor de Ricean  $K_R$ , como se muestra en (35).

$$H_{u,s}^{\text{LOS}}(\tau, t) = \sqrt{\frac{1}{K_R + 1}} H_{u,s}^{\text{NLOS}}(\tau, t) + \sqrt{\frac{K_R}{K_R + 1}} H_{u,s,1}^{\text{LOS}}(t) \delta(\tau - \tau_1) \quad (35) [4]$$

Para la implementación de este paso, el mapeo y generación de sub-clústeres ha sido generado a través del procedimiento implementado anteriormente, agregando los datos correspondientes a los ángulos de elevación zenit disponibles para IMT-2020. Para la generación de los coeficientes de canal ha sido necesaria la implementación de una nueva función, puesto que ahora se cuenta con condiciones diferentes a las anteriores y que no pueden ser resueltas mediante una generalización. Específicamente, nos referimos a la presencia de ángulos de elevación zenit, y a los arrays de antenas multidimensionales.

*Paso 12.-* Aplicar el *pathloss* y el efecto de sombra *shadowing* a los coeficientes de canal generados. Este paso se encontraba ya implementado en el software anterior y se basa en la sección 8.1 de [15].

Los procedimientos necesarios para la generación los coeficientes de canal se concentran en el archivo de código fuente C++ y su encabezado. *channel\_IMTA\_SSP.cpp* incorpora la implementación de los pasos descritos anteriormente. Como se ha mencionado, una nueva función ha sido implementada en este archivo que permite la generación de coeficientes específicamente para IMT-2020. Por ahora, el paso 12 sigue usando la función implementada en el programa de simulación para IMT-A.

### IV.3. CALIBRACIÓN DE CANAL

La calibración de canal permite comprobar, mediante la comparación de resultados obtenidos en términos de ganancia de acoplamiento (*coupling gain*), geometría en enlace descendente (*DL geometry*) con ruido blanco agregado, que los simuladores están bien implementados en base a las especificaciones provistas por los proponentes y los modelos especificados por la ITU-R. Tanto la ganancia de acoplamiento como el *wideband* SINR son salidas que actualmente genera el programa propietario de simulación del GCM, que con las actualizaciones descritas en la sección anterior responderán al nuevo modelo para evaluación de IMT-2020.

Sin embargo, es necesario actualizar el cálculo de la potencia de las señales de referencia recibidas (RSRP - *Reference Signal Received Power*). Para esto, nos hemos basado en la sección 8.1 de [15] donde se encuentra la fórmula para el cálculo de RSRP que se usa para calibración de canal y la evaluación de las prestaciones de la tecnología. Es así que se implementa una nueva función en el archivo de código fuente C++ *channel\_IMTA\_SSP.cpp*, que permite el cálculo de la ganancia de los elementos de antena considerando los parámetros de IMT-2020 y el posterior cálculo de RSRP.

## V. RESULTADOS DE CALIBRACIÓN

Mediante las suposiciones realizadas por el 3GPP para la configuración A del escenario Indoor Hotspot – eMBB [9] se generaron cuatro simulaciones correspondientes a las dos variantes de modelo de canal, y la configuración de uno o tres TRxPs en cada emplazamiento de la red.

En las Fig. 12 y Fig.13, se muestra la comparativa entre la CDF de la ganancia de acoplamiento generada por nuestro programa para el modelo A y el modelo B respectivamente, con un TRxP por emplazamiento, es decir 12 TRxPs en total.

En ambas curvas se puede apreciar una buena tendencia, ya que nuestros resultados se asemejan enormemente a los mostrados en el proceso de calibración del 3GPP [9], lo cual no solo representa que los modelos de canal se encuentran bien implementados, sino que la generación aleatoria del diseño de red y de los parámetros de pequeña escala han sido modelados de manera similar a lo realizado por los miembros del 3GPP. Sin embargo, la desviación con respecto al promedio lo largo toda la CDF se repite con ambos modelos de canal. Este aspecto debe tenerse en cuenta en el futuro, por si se trata de un error sistemático que pudiera ocasionar algún problema a los largo de los procedimientos completos de la simulación. Además, en las Fig. 14 y Fig. 15 se presentan las CDF de *wideband* SINR generada por nuestro programa para el modelo A y el modelo B respectivamente, en la configuración de un TRxP por emplazamiento. Se puede evidenciar que la relación entre la señal y la interferencia generada por las celdas vecinas más ruido corresponden de buena manera en la CDF de la simulación generada por nuestro programa con respecto a las curvas presentadas por el 3GPP.

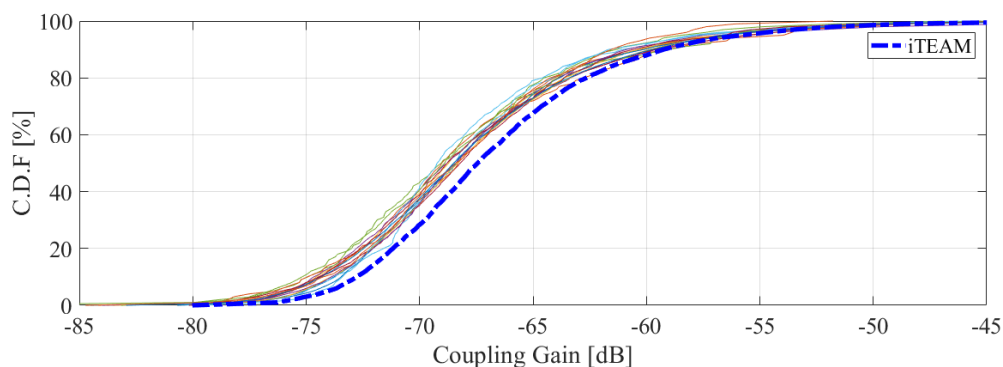


Fig.12. Comparativa ganancia de acoplamiento para la calibración de canal InH\_A Conf. A 12TRxP

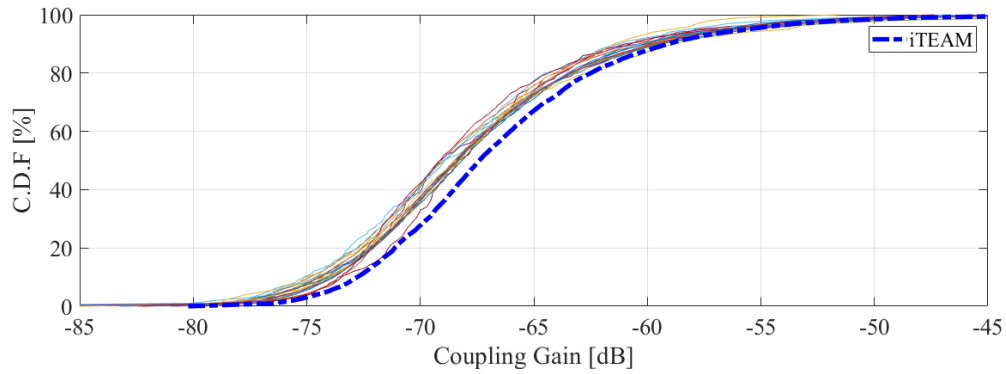


Fig.13. Comparativa ganancia de acoplamiento para la calibración de canal InH\_B Conf. B 12TRxP

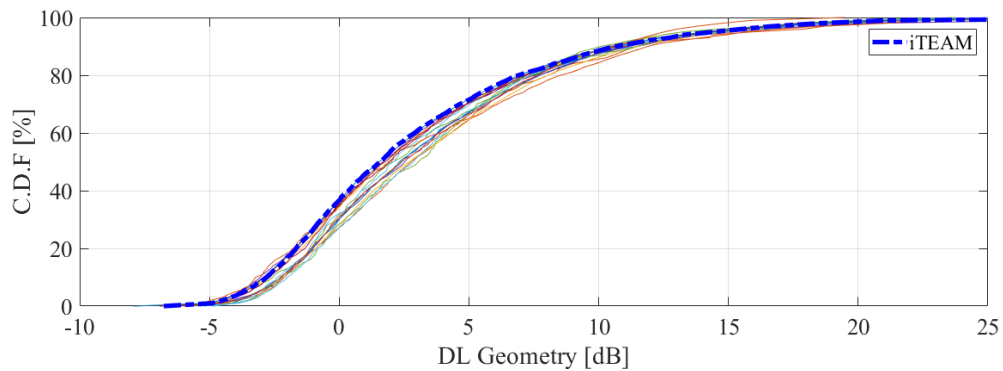


Fig.14. Comparativa *wideband* SINR para la calibración de canal InH\_A Conf. A 12TRxP

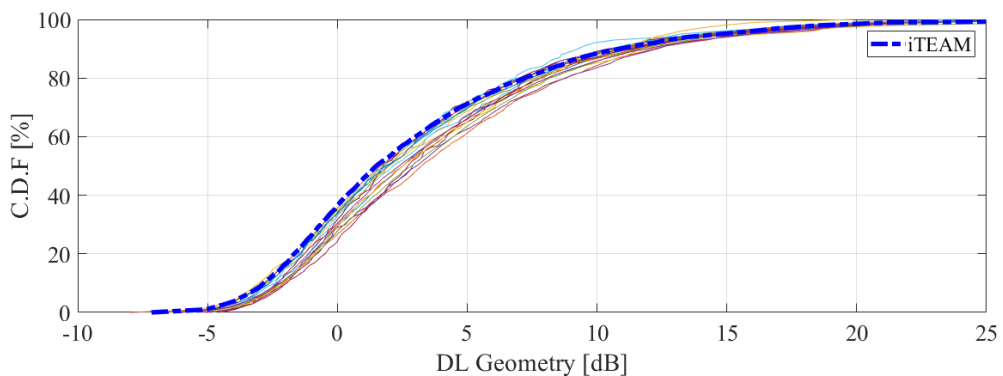


Fig.15. Comparativa *wideband* SINR para la calibración de canal InH\_B Conf. B 12TRxP

En las Fig. 16 y Fig.17, se muestra la comparativa entre la CDF de la ganancia de acoplamiento generada por nuestro programa para el modelo A y el modelo B respectivamente, con tres TRxP por emplazamiento, es decir 36 TRxPs en total. En esta configuración se evidencia una tendencia casi perfecta en ambas curvas, nuestros resultados se encuentran cerca del promedio de los mostrados en el proceso de calibración del 3GPP [9]. Se puede asegurar la implementación exitosa de varios TRxP por emplazamiento para el escenario Indoor Hotspot – eMBB, siendo una característica totalmente nueva de IMT-2020. De igual manera, en las Fig. 18 y Fig. 19 se presentan las CDF de *wideband* SINR generada por nuestro programa para el modelo A y el modelo B respectivamente, en la configuración tres TRxP por emplazamiento.

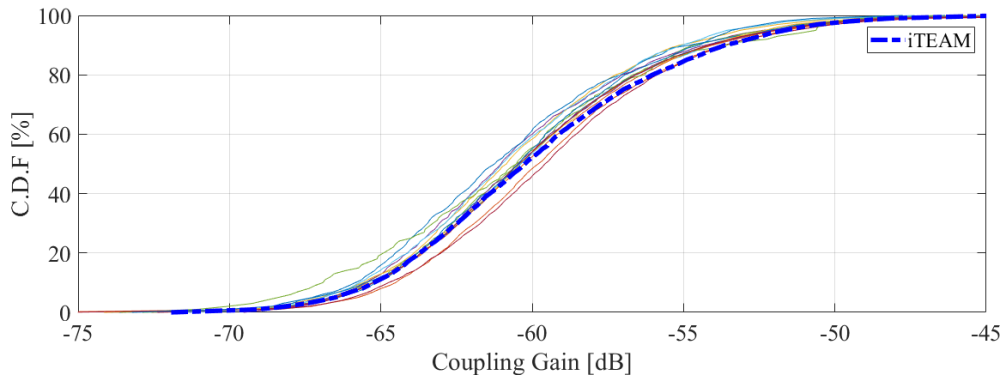


Fig.16. Comparativa ganancia de acoplamiento para la calibración de canal InH\_A Conf. A 36TRxP

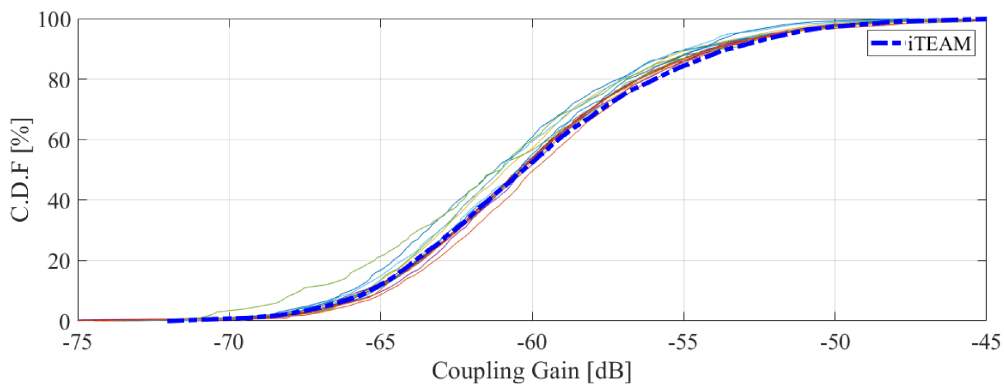


Fig.17. Comparativa ganancia de acoplamiento para la calibración de canal InH\_B Conf. A 36TRxP

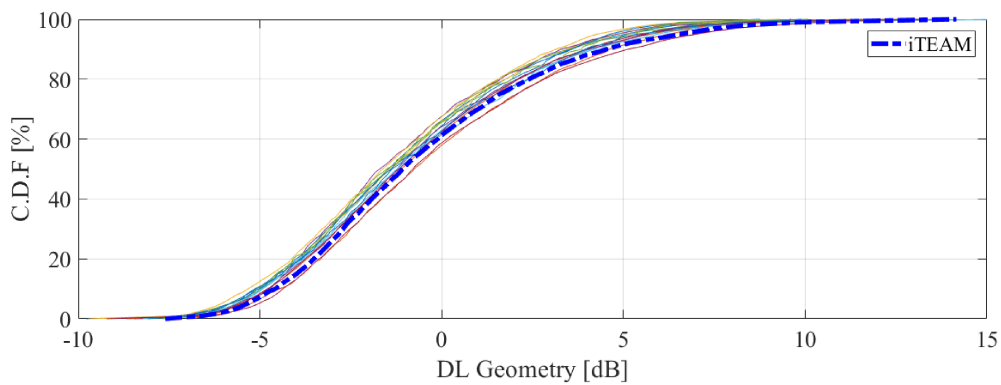


Fig.18. Comparativa *wideband* SINR para la calibración de canal InH\_A Conf. A. 36 TRxP

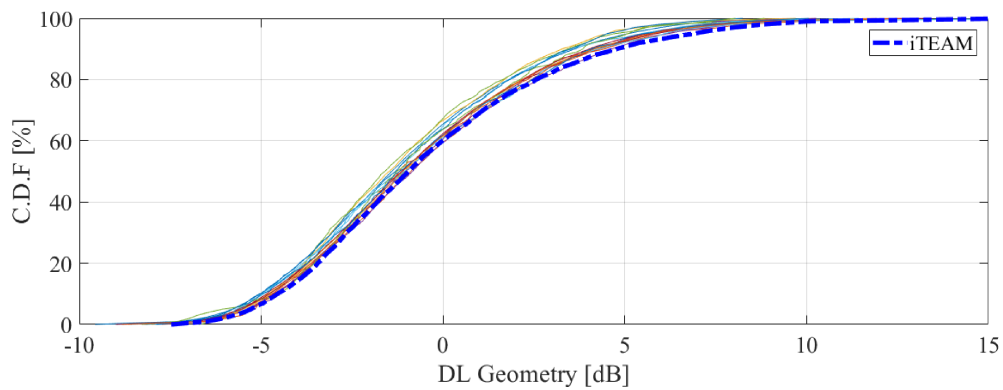


Fig.19. Comparativa CDF *wideband* SINR para la calibración de canal InH\_B Conf. B. 36 TRxP

## **VI. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS**

Mediante el procedimiento desarrollado se logró una implementación exitosa de los modelos planteados por la ITU-R. Se generaron los nuevos escenarios requeridos para la evaluación de las tecnologías radio IMT-2020, resultantes de la combinación de entornos de prueba, casos de uso y variantes del modelo de canal, que conviven con los escenarios existentes para la evaluación de tecnologías de radio IMT-A. Mientras que algunos procedimientos pudieron ser actualizados para que realicen las funciones en ambas tecnologías, otros procedimientos se incluyeron en nuevas funciones consistentes en las fórmulas, modelos y procedimientos que cubren la evaluación de IMT-2020. La enorme complejidad de los nuevos modelos de canal está evidenciada por las exigentes prestaciones que se requieren de los equipos de computación, así como la larga duración de las simulaciones. Mediante la calibración de canal se pudo comprobar la correcta implementación de los modelos para los escenarios Indoor Hotspot con 1 y 3 TRxP por emplazamiento, con las variantes de modelo A y B, en la configuración A.

Para poder completar la evolución del programa de simulación completo, quedan muchas tareas pendientes, en especial las relacionadas con el nivel de enlace que sale del tema de esta tesina. Una de las tareas propuestas a ser realizada para poder comprobar la correcta implementación de todos los modelos de canal mediante la calibración de canal, es completar el mapeo de los puertos de antena requeridos para la generación de haces, que son una de las principales novedades y puntos clave para obtener las elevadas tasas de transmisión de datos esperadas en las tecnologías IMT-2020. Después se debe completar la implementación del simulador a nivel de enlace incluyendo la propuesta del 3GPP recogida en la Release 15, cuyo proceso de evaluación se llevará a cabo el próximo año.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mi director, Jose Francisco Monserrat del Río por haberme seleccionado para desarrollar mi TFM bajo su tutela en el Grupo de Comunicaciones Móviles, pues este trabajo me ha permitido conocer el ambiente de investigación y volcar mi interés hacia las comunicaciones móviles.

Presento mis agradecimientos a mi director experimental, David Martín-Sacristán Gandía, ya que su colaboración permitió la puesta en marcha de la actualización del programa de simulación. Además por su apertura para aclarar cualquier inconveniente que se presentara a lo largo de la implementación.

Mi más sincero agradecimiento para la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación de la República del Ecuador, por el apoyo económico brindado gracias a la adjudicación de una beca del programa de becas Convocatoria Abierta 2016.

Finalmente, dar las gracias a mis padres, hermanas, cuñados, sobrinas y suegros quienes desde Ecuador nos brindan su amor incondicional; y en especial a mi esposa Marcela, gracias a su incansable apoyo en esta aventura fuera de nuestro país junto a mis hijas Danna y Dafne quienes son el motor de mi vida.

**REFERENCIAS**

- [1] J.F. Monserrat, M. García, J.J. Olmos y N. Cardona, *3GPP LTE-Advanced y su evolución hacia la 5G móvil*. MARCOMBO S.A., 2017.
- [2] P. Marsh, Ö. Bulakçi, O. Queseth, M. Boldi, *5G System Desing. Architectural and Fuctional Considerations and Long Term Research*. Great Brintain: John Wiley & Sonds Ltd, 2018.
- [3] ITU-R, *Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s), Report ITU-R M.2410-0*. Noviembre, 2017. [En línea]. Disponible: <https://www.itu.int/pub/R-REP-M.2410-2017>
- [4] ITU-R, *Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020, Report ITU-R M.2412-0*. Octubre, 2017. [En línea]. Disponible: <https://www.itu.int/pub/R-REP-M.2412-2017>
- [5] ITU-R, *Requirements, evaluation criteria and submission templates for the development of IMT-2020, Report ITU-R M.2411-0*. Noviembre, 2017. [En línea]. Disponible: <https://www.itu.int/pub/R-REP-M.2411-2017>
- [6] ITU-R, *Anticipated Time Schedule*. [En línea]. Disponible: <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-2020/Documents/Anticipated-Time-Schedule.pdf>
- [7] ITU-R, *Concepción de las IMT – Marco y objetivos generales del futuro desarrollo de las IMT para 2020 y en adelante, Report ITU-R M.2083-0*. Septiembre, 2015. [En línea]. Disponible: <https://www.itu.int/rec/R-REC-M.2083-0-201509-I/es>
- [8] D. Martín-Sacristán, J. F. Monserrat, V. Osa, J. Cabrejas, *LTE-advanced system level simulation platform for IMT-advanced evaluation*. Waves, 2011. [En línea]. Disponible: <https://pdfs.semanticscholar.org/94ac/6c47776c06d65b2a28462a624ebd99cd94d2.pdf>
- [9] 3GPP, *Summary of calibration results for IMT-2020 self evaluation, RP-180524 3GPP TSG RAN Meeting #79* Marzo, 2018. [En línea]. Disponible: [http://www.3gpp.org/ftp/tsg\\_ran/TSG\\_RAN/TSGR\\_79/Docs/RP-180524.zip](http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/TSG_RAN/TSGR_79/Docs/RP-180524.zip)
- [10] ITU-R, *IMT-2020 submission and evaluation process*. [En línea]. Disponible: <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-2020/Pages/submission-eval.aspx>
- [11] ITU-R, *Requirements related to technical performance for IMT-Advanced radio interface(s), Report ITU-R M.2134*. 2008. [En línea]. Disponible: <https://www.itu.int/pub/R-REP-M.2134/es>
- [12] ITU-R, *Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced, Report ITU-R M.2135-1*. Diciembre, 2009. [En línea]. Disponible: <https://www.itu.int/pub/R-REP-M.2135/es>
- [13] 3GPP, *Technical Specification Group Radio Access Network; Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (Release 15), TR 38.901 V15.0.0*. Junio, 2018. [En línea]. Disponible: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3173>
- [14] <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3173>
- [15] J. F. Monserrat, R. Fraile, and L. Rubio (2007), *Application of alternating projection method to ensure feasibility of shadowing cross-correlation models*, *Electron. Lett.*, 43(13), 724 – 725, doi:10.1049/el:20070236.
- [16] 3GPP, *Technical Specification Group Radio Access Network; Study on 3D channel model for LTE (Release 12), TR 36.873 V12.7.0*. Mayo, 2018. [En línea]. Disponible: [http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36\\_series/36.873/36873-c70.zip](http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.873/36873-c70.zip)