

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIÓN
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA



Proyecto Fin de Carrera

**Desarrollo de una herramienta para predecir la calidad de servicio de
redes de interior de siguiente generación**



AUTOR: Andrés Almarcha López

DIRECTOR: Wout Joseph / David Plets

COORDINADOR ERASMUS: Jose María Molina García-Pardo

Abril / 2015

Descripción bibliográfica

Autor

Andrés Almarcha López

Email

andres.almarcha@gmail.com

Directores

Wout Joseph, David Plets

Email del director

wout.joseph@intec.ugent.be , david.plets@intec.ugent.be

Coordinador erasmus UPCT

José María Molina García-Pardo

Título

Desarrollo de una herramienta para predecir la calidad de servicio de redes de interior de siguiente generación.

Descriptores

WiGig, IEEE 802.11ad, ray tracer, trazador de rayos, calidad de servicio, QoS, 60 GHz, mm wave

Resumen

En este trabajo se ha desarrollado e implementado una herramienta para ser integrada en la aplicación ya existente “WiCa Heuristic Indoor Propagation Prediction Tool”, de forma que sea capaz de estimar las pérdidas de camino por una señal a 60 GHz en una habitación determinada y predecir el rendimiento de una red que funcione en esa banda. Este proyecto se centra en las especificaciones del protocolo WiGig/802.11ad para calcular el rendimiento disponible, aunque la estimación de las pérdidas de camino, y otros parámetros simulados por la herramienta, como el “power delay profile”, pueden ser útiles para predecir la calidad de servicio alcanzada por otros protocolos.

A la hora de predecir el rendimiento, en primer lugar se ha caracterizado la propagación de la señal en los 60 GHz, de forma que las pérdidas de camino puedan ser estimadas usando un trazador de rayos. Después de determinar las pérdidas de camino, se predice la QoS (calidad de servicio, por sus siglas en inglés) en cada punto de la habitación en base al balance del enlace, y comparando este resultado con las especificaciones del protocolo IEEE 802.11ad.

Titulación

Ingeniería de Telecomunicación

Intensificación

Sistemas y Redes de telecomunicación

Departamento

Wireless & Cable, Universiteit Gent / Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, UPCT

Fecha de presentación

Octubre 2015

Contenido

1.	Introducción	1
1.1.	Motivación	1
1.2.	Objetivo.....	1
1.3.	Estructura del documento.....	1
2.	Estudio teórico	2
2.1.	Introducción a la capa física.....	2
2.2.	Caracterización de la banda de los 60 GHz.....	2
2.3.	Esquema de modulación y codificación.....	2
2.4.	Antenas y formación y rotado de lóbulos.....	2
3.	Cálculo de las pérdidas de camino	2
3.1.	Resumen de los modelos implementados para el cálculo de las pérdidas de camino ...	2
3.2.	Modelo de rayo directo	2
3.3.	Modelo de rayo directo teniendo en cuenta difracción	3
3.4.	Modelo de trazado de rayos reflejados.....	3
3.5.	Modelo de trazado de rayos reflejado aplicando difracción sobre humanos.....	3
3.6.	Modelo de trazado de rayos simplificado.....	3
4.	Prueba de los modelos de pérdida de camino.....	4
4.1.	Configuración.....	4
4.2.	Resultados para pérdidas de camino por rayo directo.....	4
4.3.	Resultados para pérdidas de camino por rayo reflejado en 3D	5
4.4.	Resultados para pérdidas de camino por rayo reflejado en 2D	5
4.5.	Conclusiones de los resultados de las pruebas	5
5.	Herramienta para estimar la calidad de servicio	6
5.1.	Resumen de la herramienta	6
5.2.	Simulación usando antenas capaces de rotar su lóbulo principal.....	6
5.3.	Conclusiones	7
6.	Verificación usando FEKO	8
6.1.	Configuración.....	8
6.2.	Resultado de la comparativa	8
6.3.	Conclusión de la comparativa	9
7.	Conclusiones y trabajo pendiente.....	9
7.1.	Conclusión.....	9
7.2.	Trabajo pendiente.....	10
8.	Bibliografía	10

1. Introducción

1.1. Motivación

Las redes inalámbricas de interior de próxima generación, entendidas como protocolo WiGig/802.11ad o protocolo WirelessHD, prometen llegar a velocidades de datos del orden de gigabits por segundo que es mucho más que el alcanzado por las tecnologías WiFi actuales: 600 Mbps para 802.11n y 2.34 Gbps para 802.11ac contra los 7 Gbps que pueden alcanzarse por el protocolo 802.11ad. Además, gracias a la utilización de antenas muy directivas se va a posibilitar la reutilización espacial o el uso del multiplexado espacial, permitiendo un uso mucho más eficiente de los recursos del canal habilitando transmisiones simultáneas en el mismo entorno sin que interfieran entre sí.

Para lograr estas características, estas redes van a hacer uso de la banda sin licencia y disponible en todo el mundo de los 60 GHz, frente a los 2.4/5 GHz de los protocolos 802.11 a/b/g/n/ac. Debido a su longitud de onda corta, el uso de esta banda dará lugar a muchos retos que tienen que ser superados, sobre todo alta atenuación a través de obstáculos, como paredes, techos, o el cuerpo humano. Para posibilitar enlaces de datos en esta banda de frecuencias será probable que se realicen por cualquiera de las líneas LoS (con visión directa, por sus siglas en inglés) o por caminos reflejados.

Por lo tanto, con el fin de determinar la conveniencia de la implementación de una red en la banda de 60 GHz en un determinado espacio, y para determinar la mejor posición de los puntos de acceso para lograr el mayor rendimiento posible, es necesaria una herramienta de predicción de calidad de servicio.

1.2. Objetivo

El objetivo de este trabajo es desarrollar e implementar una herramienta para ser integrada en la aplicación ya existente “WiCa Heuristic Indoor Propagation Prediction Tool” [1] desarrollada por el departamento de “Wireless & Cable” de la Universidad de Gante, de forma que sea capaz de estimar las pérdidas de camino por una señal a 60 GHz en una habitación determinada y predecir el rendimiento de una red que funcione en esa banda. Este proyecto se centra en las especificaciones del protocolo WiGig/802.11ad para calcular el rendimiento disponible, aunque la estimación de las pérdidas de camino, y otros parámetros simulados por la herramienta, pueden ser útiles para predecir la calidad de servicio alcanzada por otros protocolos.

A la hora de predecir el rendimiento, en primer lugar se debe caracterizar la propagación de la señal en los 60 GHz, de forma que las pérdidas de camino puedan ser estimadas. Después de determinar las pérdidas de camino, el siguiente paso es predecir la QoS (calidad de servicio, por sus siglas en inglés) en cada punto de la habitación en base al balance del enlace, y comparando este resultado con las especificaciones del protocolo IEEE 802.11ad.

1.3. Estructura del documento

Este documento se estructura como sigue:

- Explicación de cómo y dónde se define el protocolo 802.11ad, así como una recopilación de diferentes fuentes que explican el comportamiento de la señal a 60 GHz.
- Explicación de los diferentes modelos implementados para estimar las pérdidas de camino.
- Simulaciones realizadas con los diferentes modelos implementados para calcular las pérdidas de camino.
- Simulación de la herramienta para la estimación del QoS de redes WiGig.

- Validación de la herramienta usando el solucionador electromagnético FEKO.
- Conclusiones y trabajo pendiente.

Cabe puntualizar que este documento es un resumen traducido del original “Development of a prediction tool of QoS for next-generation indoor wireless networks” [2].

2. Estudio teórico

2.1. Introducción a la capa física

Información sobre la capa física usada por el protocolo WiGig puede ser recogida de [3] y de [4] entre otros.

2.2. Caracterización de la banda de los 60 GHz

Información tanto experimental como teórica acerca de las pérdidas de camino sufridas por la señal en la banda milimétrica puede ser encontrada en [5] o [6] entre otros, mientras que las pérdidas por reflexión y transmisión de la señal se pueden encontrar en [7], [8], [9], [10] o [11] entre otros; por otra parte, el efecto de la difracción en esta banda puede ser caracterizado usando la información encontrada en [12], [13] o [14] entre otros; la influencia sobre la señal por la presencia de personas incluyendo el movimiento de éstos puede ser encontrada en [15], [16], [17], [18] o [19] entre otros; información acerca de otros parámetros necesarios para caracterizar la banda de los 60 GHz, como el perfil de retraso de potencia, el ancho de banda de coherencia, o el ángulo de propagación puede ser encontrada en [6], [20] o [21] entre otros.

2.3. Esquema de modulación y codificación

Información acerca de la modulación y codificación usadas por el protocolo 802.11ad, necesaria para predecir el rendimiento de una red que use este protocolo, está disponible en [22] y [23].

2.4. Antenas y formación y rotado de lóbulos

Diferentes antenas diseñadas para trabajar en la banda de los 60 GHz pueden ser encontradas en [24], [25], [26] o [27]. Cabe destacar que para el uso del protocolo WiGig lo más probable es que se usen formaciones de antenas capaces de formar lóbulos y de rotarlos. El protocolo de rotado de lóbulos está definido en [22] y [23], protocolos alternativos para el rotado de lóbulos han sido estudiados en [28].

3. Cálculo de las pérdidas de camino

3.1. Resumen de los modelos implementados para el cálculo de las pérdidas de camino

Se han implementado cinco modelos para calcular las pérdidas de camino a 60 GHz: Dos calcularán las pérdidas de camino sufridas por el rayo directo entre el transmisor y el receptor, uno teniendo en cuenta el efecto de la difracción y otro no; el siguiente modelo es un trazador de rayos 3D que calculará las pérdidas de camino entre el transmisor y el receptor, teniendo en cuenta todas las trayectorias que pueden llegar a este último por medio de reflexiones en los diferentes elementos de una habitación; habrá otro trazador de rayos 3D que será igual pero además teniendo en cuenta la difracción sufrida por el rayo al encontrarse con humanos; por último, se ha implementado un trazador de rayos más simple en 2D.

3.2. Modelo de rayo directo

Este modelo calculará las pérdidas de camino sufridas por el rayo que va directo desde el transmisor al receptor, calculando las pérdidas sufridas por el rayo al atravesar los diferentes elementos de una habitación.

3.3. Modelo de rayo directo teniendo en cuenta difracción

Este modelo calculará las pérdidas de camino de la misma forma que el anterior, pero además cuando sea posible, calculará el rayo difractado aplicando “knife edge diffraction”. Además de aplicar este método, si a un objeto que bloquea el rayo directo se pudiera simplificar como si fuera una pantalla [19], se aplicará “knife edge diffraction” a los cuatro límites del objeto simplificado de manera similar a como se aplica en [17], aplicando además las simplificaciones de [16] y [15].

También se contempló el uso de la formulación UTD-PO para el análisis de la difracción por múltiples cilindros, pero se descartó por la dificultad de su implementación, y porque en este modelo solo serviría para calcular la difracción causada por las cabezas de la gente en una habitación.

3.4. Modelo de trazado de rayos reflejados

Para determinar las pérdidas de camino de un enlace de forma fiable, se deben determinar todos los posibles caminos entre receptor y transmisor. Para hacer esto, hay que tener en cuenta aquellos caminos que puede seguir un rayo al verse reflejado.

En este modelo, por lo tanto, se almacenarán los caminos que puede seguir la señal al reflejarse en los distintos elementos que forman una habitación, para ello el modelo lanzará rayos desde el transmisor de forma tridimensional, trazando su trayectoria, y calculando las pérdidas provocadas por la reflexión.

Además, recogerá información acerca de los rayos que alcancen el objetivo sobre su ángulo de salida y de llegada, y sobre su distancia recorrida; este tipo de información será útil a la hora de calcular diferentes parámetros que ayudarán a estimar la calidad de servicio, como por ejemplo la dispersión en el tiempo de llegada de la señal, o el perfil de potencia de los diferentes rayos.

3.5. Modelo de trazado de rayos reflejado aplicando difracción sobre humanos

Este modelo es igual que el trazador de rayos explicado anteriormente, pero en esta ocasión, cuando un rayo es obstaculizado por una persona, en lugar de verse reflejado en ella, se difractará y se calcularán las pérdidas debido a este efecto.

Esto se hace así porque si hay mucha gente en la habitación será común que la señal pueda verse bloqueada por personas, siendo más probable que esta llegue al ser difractada que reflejada en la persona.

El efecto de la difracción se calculará de la misma forma que en el modelo *3.3 Modelo de rayo directo teniendo en cuenta difracción*, aproximando las personas a una pantalla [19].

3.6. Modelo de trazado de rayos simplificado

Este modelo es igual a *3.4 Modelo de trazado de rayos reflejados*, pero en esta ocasión, solo se lanzarán rayos teniendo en cuenta la vista superior de la habitación, esto es haciendo un barrido solo en azimut desde el transmisor; si un rayo lanzado de esta manera llega al receptor, se comprueba posteriormente que es posible seguir esa trayectoria teniendo en cuenta la vista 3D de la habitación. De esta forma, se salvan una gran cantidad de recursos a la hora de trazar los rayos, a costa de perder un determinado número de trayectorias que puede seguir la señal y que solo pueden ser descubiertos haciendo un barrido en 3D.

4. Prueba de los modelos de pérdida de camino

4.1. Configuración

La habitación en la que se han probado los modelos puede verse en la Figura 1, formada por diferentes objetos e incluso personas. Los diferentes objetos, además de por sus dimensiones, están definidos por su permitividad relativa.

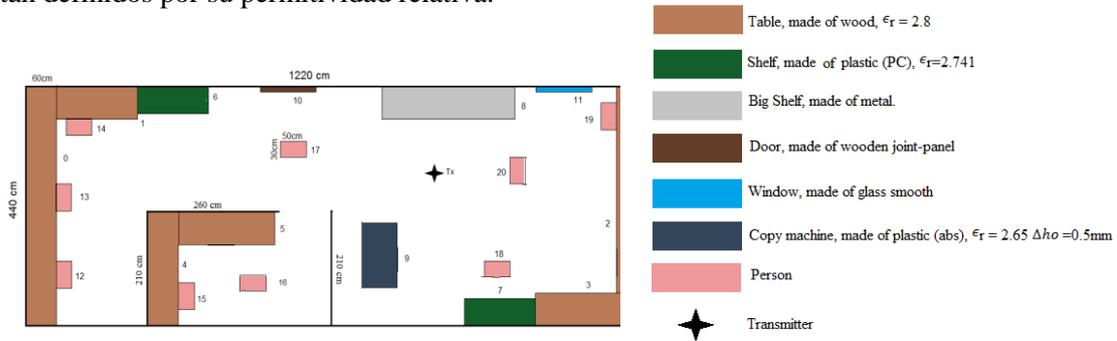


Figura 1 – Habitación modelada

La configuración usada por los diferentes modelos para esta prueba se encuentra resumida en la Tabla 1.

Parámetro	Valor
Incremento de la elevación en rayos lanzados $\Delta\theta$	$\pi/100$ rad
Incremento del azimut en rayos lanzados $\Delta\phi$	$\pi/100$ rad
Margen del receptor	10 cm
Altura del receptor	130 cm
Altura del transmisor	100 cm
Máximas pérdidas sufridas por rayo	200dB
Máximo número de reflexiones	10
Polarización de la antena	Horizontal

Tabla 1 – Configuración usada por los modelos

4.2. Resultados para pérdidas de camino por rayo directo



Figura 2 – Pérdidas de camino con el modelo de rayo directo (izquierda) y aplicando difracción (derecha)

Usando los modelos de rayo directo se puede comprobar como, en las zonas detrás de elementos de la habitación las pérdidas de camino son enormes; por esta razón se hace palpable la necesidad de calcular los posibles caminos que puedan llegar a esas zonas por medio de reflexiones, ya que, aunque calculando los caminos difractados se aprecia una reducción en las pérdidas de camino, esta diferencia no es muy grande.

4.3. Resultados para pérdidas de camino por rayo reflejado en 3D

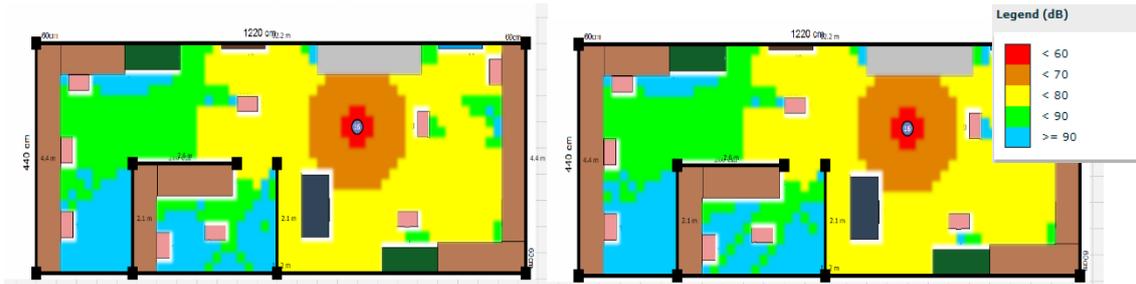


Figura 3 – Pérdidas de camino con los modelos de rayo reflejado 3D simple (izquierda) y aplicando además difracción sobre humanos (derecha)

Aparentemente, los resultados teniendo en cuenta los caminos reflejados son más realistas: las pérdidas de camino en áreas detrás de elementos de la habitación se encuentran más atenuados que en áreas a la vista, pero sin mostrar una degradación tan alta como la vista usando los modelos anteriores. Por otra parte, se siguen encontrando unas pérdidas muy grandes en áreas en las que un rayo solo puede llegar después de haber sido reflejado en numerosas ocasiones.

Respecto a la diferencia entre calcular el rayo difractado en las personas y no hacerlo, se puede apreciar como es casi inexistente en términos de pérdida de camino, esto es debido a que el rayo menos atenuado que llega a un punto detrás de una persona, normalmente no ha sido ni reflejado en esa persona ni difractado en ella, sino que llega desde otro punto; por lo tanto el camino indicado en la simulación es el mismo en ambos casos.

La gran diferencia entre estos dos modelos, es que, el modelo que calcula los rayos difractados en los humanos, es 11 veces más rápido que el modelo que calcula los rayos reflejados, esto es porque los rayos reflejados en la gente apenas tienen importancia en el cálculo de las pérdidas de camino, ya que no suelen llegar al receptor o lo hacen muy atenuados, y se pierde tiempo en su cálculo.

4.4. Resultados para pérdidas de camino por rayo reflejado en 2D

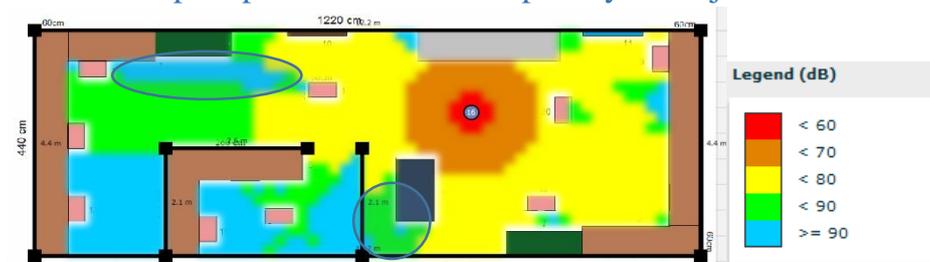


Figura 4 – Pérdidas de camino con modelo de rayos reflejados 2D

En este caso se puede apreciar como, aunque el resultado es muy similar al presentado usando los modelos de caminos reflejados en 3D, detrás de áreas donde el rayo podría pasar por encima del elemento, ya sea directamente o reflejándose (áreas señaladas con círculo), la atenuación simulada usando este modelo es mayor, ya que esos caminos no se tienen en cuenta.

Por otra parte este modelo es unas 13 veces más rápido que el modelo de rayo reflejado en 3D aplicando difracción sobre humanos, esto es unas 155 veces más rápido que el modelo de rayo reflejado en 3D simple.

4.5. Conclusiones de los resultados de las pruebas

De los resultados se puede extraer que para hallar los caminos con menos pérdidas hace falta iterar por todos ellos, haciendo imprescindible el uso de un modelo que calcule los rayos

reflejados, ya que la diferencia con calcular solo los rayos directos en la banda de los 60 GHz es muy amplia.

Además, se ha observado que aplicar solo una vista en 2D de la habitación reduce enormemente el tiempo de computación, ofreciendo unos resultados bastante buenos.

5. Herramienta para estimar la calidad de servicio

5.1. Resumen de la herramienta

Para calcular la potencia recibida en cada punto de la habitación, con el fin de comparar dicho valor con las especificaciones del protocolo WiGig para estimar el rendimiento de la red, se usarán las ecuaciones 1 y 2:

$$Pr_{Total}[dBm] = 10 * \log(10^{\frac{Pr_1[dBm]}{10}} + 10^{\frac{Pr_2[dBm]}{10}} + \dots + 10^{\frac{Pr_n[dBm]}{10}}) \text{ Ecuación 1}$$

$$Pr_n[dBm] = Ptx[dBm] + Gtx(\theta, \phi)[dB] - PLn[dB] + Grx(\theta, \phi)[dB] \text{ Ecuación 2}$$

Siendo $Ptx[dBm]$ la potencia del transmisor, $Gtx(\theta, \phi)$ y $Grx(\theta, \phi)$ la ganancia de las antenas de transmisión y recepción respectivamente en la dirección del camino calculado, y $PLn[dBm]$ la pérdida de camino del camino calculado.

Por lo tanto, la potencia recibida total será la suma de las potencias recibidas en cada uno de los múltiples caminos, esto se hace así porque el ancho de banda de coherencia a 60 GHz (500 MHz) es mucho menor que el ancho de banda usado por el protocolo WiGig (2.2 GHz), por lo tanto se trata de un sistema de banda ancha y no hace falta tener en cuenta la diferencia de fase de cada uno de los caminos [12] [21].

Por otra parte, la herramienta posibilita la introducción de diagramas de radiación en un formato muy parecido al usado por el solucionador EM FEKO, de forma que es posible simular una antena en dicho solucionador, e importar el diagrama de radiación resultante a la herramienta para la simulación del rendimiento de la red.

5.2. Simulación usando antenas capaces de rotar su lóbulo principal

Tal y como se ha indicado anteriormente, será probable que las antenas usadas en dispositivos que implementen el protocolo WiGig sean agrupaciones de antenas capaces de rotar su lóbulo principal; para esta simulación se ha optado por modelar una formación 2x2 basada en [29], con una ganancia máxima de 13.5 dBi; el diagrama de radiación modelado puede verse en la Figura 5.

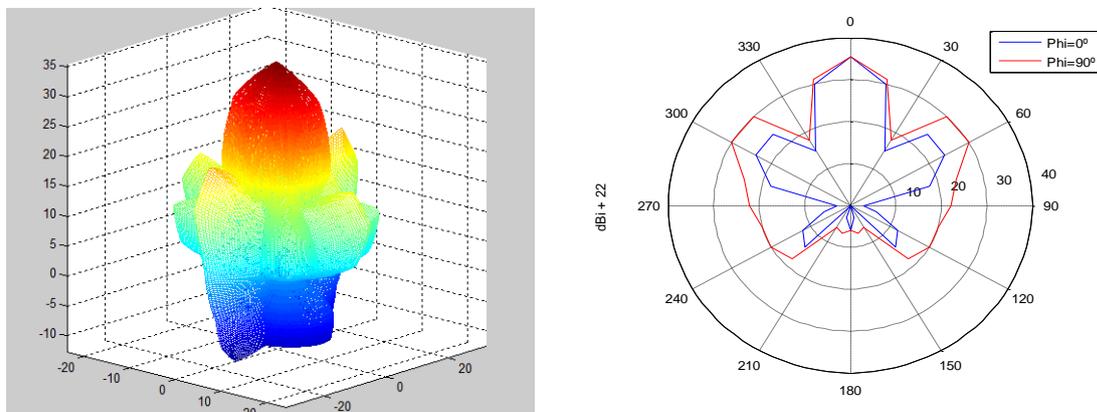


Figura 5 – Diagrama de radiación modelado en 3D (izquierda) y 2D (derecha)

El algoritmo simulado para rotar el lóbulo está basado en el modo de funcionamiento PET [22] [23], que estimará el camino con menos pérdidas y rotará el lóbulo hacia allí, siguiendo la trayectoria del receptor en caso de que se mueva. Por simplicidad, la herramienta no calculará el entrenamiento de los pesos de la fase de los elementos de la agrupación, necesario para conseguir el formado del lóbulo en la trayectoria correcta, sino que directamente asumirá que el entrenamiento ha sido finalizado con un resultado óptimo, y por lo tanto, el diagrama de radiación rotará de forma ideal.

La potencia recibida estimada al realizar la simulación con un transmisor de 10 dBm de potencia, y usando el modelo de rayos reflejados 2D, junto con la estimación del rendimiento de la red en Mbps, puede verse en la Figura 6. En ella, se puede observar como no solo prácticamente la totalidad de la habitación se cubre con el uso de un único punto de acceso, sino que además, el ancho de banda disponible es muy alto por lo general.

El uso de antenas con capacidad para rotar su lóbulo principal, tanto en el transmisor como en el receptor, parece solventar el problema de la alta atenuación en la banda de los 60 GHz.

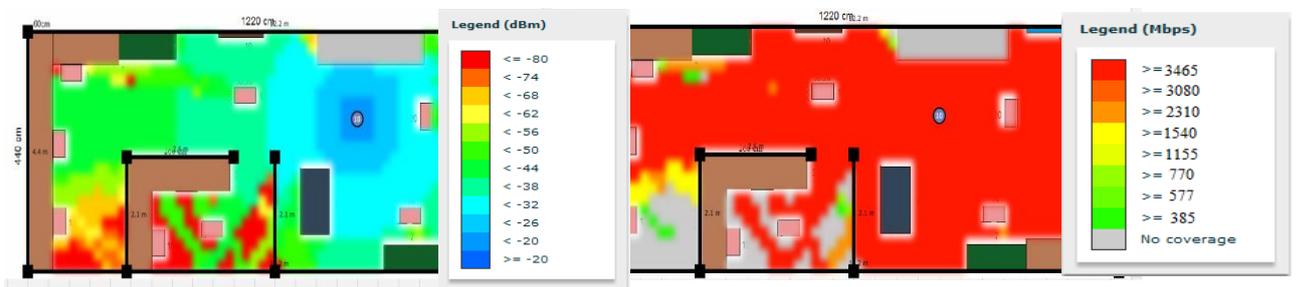


Figura 6 – Potencia recibida estimada (izquierda) y velocidad en bits estimada (derecha)

5.3. Conclusiones

Además de la simulación mostrada aquí, la herramienta ha sido probada usando diferentes configuraciones de antenas en el transmisor/receptor. Los resultados de estas simulaciones se pueden observar en la Figura 7, en forma de comparación de ancho de banda vs. percentil.

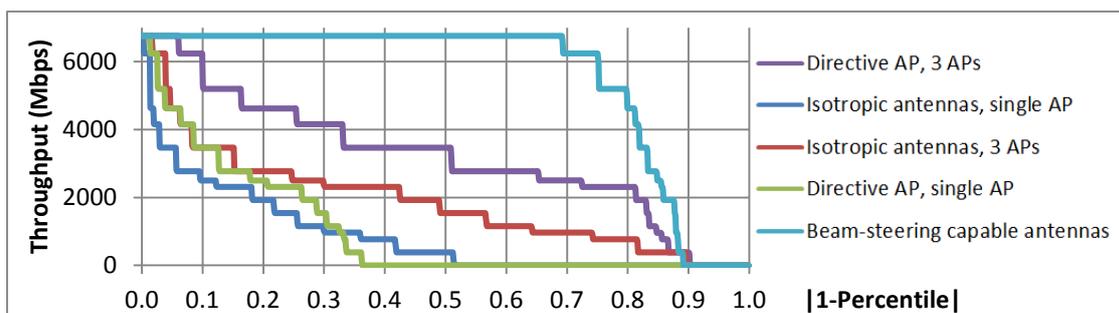


Figura 7 – Resumen de la estimación de máximo ancho de banda disponible para diferentes configuraciones

Observando la figura, queda claro que la mejor opción es usar antenas directivas capaces de rotar su lóbulo principal, ya que se es capaz de alcanzar el máximo ancho de banda en un 70% de la habitación, y además, conseguir una cobertura mínima para el 90% de la habitación, usando un único punto de acceso (transmisor). Para alcanzar el mismo nivel de cobertura mínima usando puntos de acceso con antenas isotópicas, o directivas pero sin capacidad de rotación, se necesitó hacer uso de 3 de ellos, y aun así, solo se consiguió alcanzar el máximo ancho de banda en un 5% y un 2% de la habitación respectivamente.

6. Verificación usando FEKO

6.1. Configuración

Para validar la estimación de potencia de la herramienta se compararán sus resultados con la estimación proporcionada por el solucionador EM FEKO. Para ello, se usará el motor de físicas ópticas (PO) de FEKO; se usará este motor ya que aunque se intentó simular una habitación usando primero el motor más preciso por método de momentos (MoM), el gran tamaño eléctrico de la habitación hizo inviable la simulación, y por lo tanto haciendo del motor PO el más adecuado para la simulación [30]. Cabe destacar que, para realizar la simulación usando este último motor, se necesitó de un ordenador de alto rendimiento.

Además, con los medios de los que se disponían, no se pudo simular diferentes permitividades eléctricas de los elementos que componen la habitación, por lo que en esta comparativa, la habitación, que puede verse en la Figura 8, está compuesta de metal en su totalidad.

Por último, la configuración de FEKO será la predeterminada, con un número máximo de interacciones del rayo de 3, y realizándose un barrido en frecuencias de 57.24 GHz a 59.4 GHz de 15 puntos, correspondientes al primer canal del protocolo WiGig. Por otra parte, en el caso de la herramienta, se usará la configuración mostrada en la Tabla 2. La potencia del transmisor será de 10 dBm, y las antenas serán isotrópicas para una comparación directa de la estimación de pérdidas de camino.

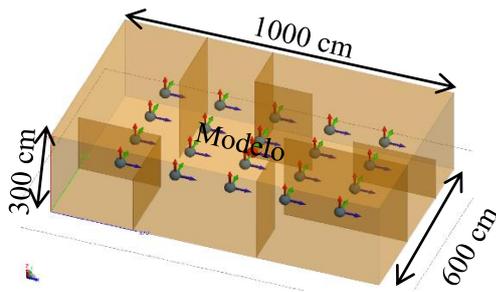


Figura 8 – Habitación metálica modelada en Feko para validación

Modelo usado	Reflejo de rayos 3D
$\Delta\theta/\Delta\phi$	$\pi/1024$ rad
Margen de Rx	1 cm
Max pérdidas	100 dB
Max reflexiones	3

Tabla 2 – Configuración de herramienta para validación

6.2. Resultado de la comparativa

Los resultados de la estimación de potencia recibida pueden apreciarse en la Figura 9, donde también puede evaluarse la desviación típica de la potencia recibida en función de las frecuencias que componen el ancho de banda del protocolo WiGig.

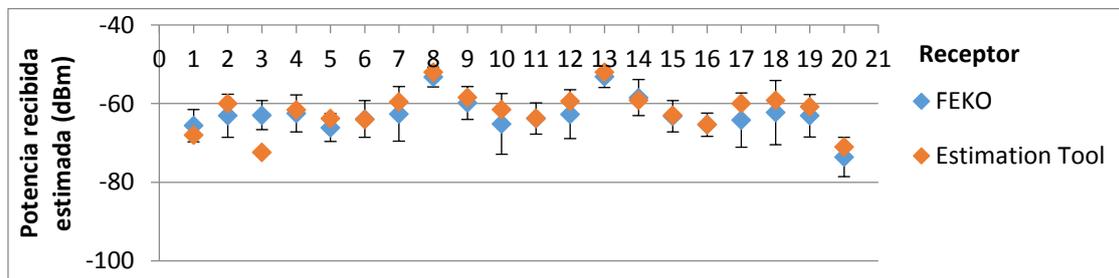


Figura 9 – Comparativa en la estimación de la potencia recibida por FEKO y por la herramienta

Como se puede observar, normalmente la herramienta de estimación de QoS estima más potencia recibida que FEKO, este puede deberse a los efectos de onda que se tienen en cuenta usando el motor PO y que no se consideran en la herramienta.

Para una comparación más sencilla, en la Figura 10 puede observarse diferencia en dB de la potencia estimada por FEKO y por la herramienta en términos percentiles. En ella se comprueba

que la diferencia media es de 2.28 dB, con una diferencia para el percentil del 95% de 4.52, valores más que decentes teniendo en cuenta el mucho mayor coste computacional del motor de FEKO.

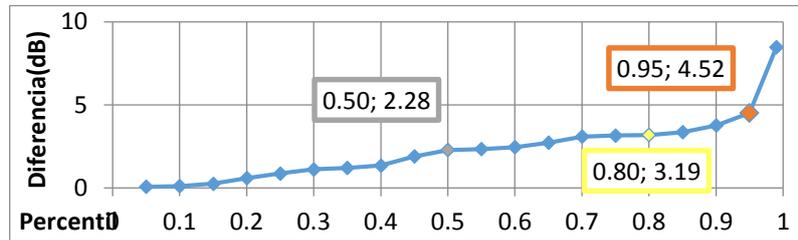


Figura 10 – Diferencia en la estimación de la potencia recibida por FEKO y por la herramienta en percentil

6.3. Conclusión de la comparativa

Se ha comprobado que la estimación de potencia recibida por parte de la herramienta comercial FEKO, y de la herramienta presentada aquí, no difieren demasiado, más teniendo en cuenta que la solución proporcionada por FEKO se trata de una aproximación de banda estrecha; esto quiere decir que hay una estimación de potencia para cada frecuencia del espectro de WiGig, contrastando con la solución aportada por la herramienta de predicción de rendimiento, que evalúa la potencia recibida teniendo en cuenta que el canal es de banda ancha.

Esto conlleva a diferencias insalvables, debido al efecto de *fading* provocado por la propagación multicamino. Sin embargo, la potencia recibida estimada por la herramienta, típicamente cae dentro de los límites de la desviación típica de potencia recibida estimada por FEKO.

Por último, aunque ausentes en este documento, se han hecho pruebas variando el tamaño de la habitación, y se ha comprobado que la diferencia disminuye cuando la habitación simulada es mayor, por lo que se cumple el objetivo de realizar una herramienta confiable de estimación del rendimiento de redes WiGig para habitaciones de interior.

7. Conclusiones y trabajo pendiente

7.1. Conclusión

En este proyecto se ha descrito el entorno en los que la herramienta de estimación de calidad de servicio debe funcionar. Es decir, la capa física y los requerimientos de potencia del protocolo para el cual esta herramienta tiene como objetivo estimar su rendimiento.

Junto a esto, se ha explicado brevemente cómo funciona el rotado de lóbulos en el protocolo WiGig, además de recopilar algunas antenas diseñadas para trabajar en la banda de los 60 GHz.

Después de esto, se ha detallado el funcionamiento de los diferentes modelos para el cálculo de las pérdidas de camino implementados. Además, se han efectuado numerosas simulaciones y comparaciones entre ellos para determinar cuál es el mejor para el objetivo de la herramienta. Concluyéndose que se deben tener en cuenta los caminos reflejados para poder estimar correctamente las pérdidas de camino en esta banda de frecuencias.

Posteriormente, se ha explicado como la herramienta estimará el rendimiento de la red dependiendo del número de puntos de acceso (PA), y de los tipos de antenas (isotrópicos, directivos, y capaces de rotar su lóbulo), concluyéndose que debido a la gran atenuación sufrida por la señal, el uso de antenas directivas es crítico para conseguir un gran ancho de banda. Además de que la utilización de antenas capaces de rotar su lóbulo, puede ahorrar el uso de más de un punto de acceso a la hora de cubrir una habitación grande.

Finalmente, la herramienta presentada ha sido verificada, comparando la estimación de las pérdidas de camino simuladas por esta y por el solucionador EM FEKO, resultando en una diferencia lo suficientemente pequeña como para considerar la herramienta confiable a la hora de estimar el máximo rendimiento de una red que use el protocolo WiGig en entornos de interior.

En conclusión, ahora se encuentra disponible para integrar con “WiCa Heuristic Indoor Propagation Prediction Tool” una herramienta versátil para la estimación de la calidad de servicio del protocolo WiGig.

7.2. Trabajo pendiente

Aunque la herramienta de estimación de calidad de servicio presentada aquí ya ofrece rendimiento suficiente para cumplir su objetivo en diferentes escenarios, la herramienta puede ser mejorada para mejorar precisión y añadir funciones.

Algunas ideas para expandir su funcionalidad son:

- Añadir capacidad de simular más configuraciones de polarización de antena: por el momento, solo tiene capacidad para simular antenas con la misma polarización en transmisor y receptor, y solo del tipo vertical u horizontal.
- Añadir capacidad para dibujar el diagrama de radiación de la antena: actualmente, este debe ser definido manualmente o usando software de terceros como FEKO.
- Añadir capacidad para simular el criterio de intercambiado de lóbulo y seguimiento (BST): al presente, el único criterio soportado cuando se simulan antenas capaces de rotar su lóbulo es el criterio PET, del que solo algunas configuraciones de antenas pueden hacer uso [22] [23].

Además de estas consideraciones, se puede mejorar la exactitud de la herramienta a la hora de estimar la potencia recibida, y por lo tanto, a la hora de calcular el rendimiento de la red, siguiendo los siguientes puntos:

- Integrar todos los modelos de pérdidas de camino en uno de forma que los trazadores de rayos, además de calcular los caminos reflejados, sean capaces de calcular el rayo directo y los difractados.
- Mejorar el modelo de pérdidas de camino de rayos difractados para que sea capaz de calcular difracción en paredes y esquinas.
- Añadir datos estocásticos de multicamino a los datos deterministas calculados por la herramienta mejoraría la estimación de potencia recibida [31] [10] [15] [13], y predeciría el *fading* multicamino [32].
- Calcular los cambios de polarización sufridos por el rayo durante su propagación.
- Añadir soporte para elementos con permitividad relativa compleja, es decir, materiales con pérdidas.

Para finalizar, una última tarea que puede realizarse, es validar la herramienta por medio de mediciones reales.

8. Bibliografía

- [1] iMinds-UGent-WiCa, «WiCa Heuristic Indoor Propagation Prediction Tool (WHIPP),» [En línea]. Available: <http://www.wica.intec.ugent.be/exposure-tool/expert-edition>.

- [2] A. Almarcha-López, «Development of a prediction tool of QoS for next-generation indoor wireless networks,» Univeristeit Gent, 2015. Email: andres.almarcha@gmail.com
- [3] W.-F. Alliance, «WiGig® and the future of seamless connectivity,» September 2013.
- [4] A. Technologies, «Wireless LAN at 60 GHz - IEEE 802.11ad,» 2013.
- [5] O. Koymen, A. Partyka, S. Subramanian y J. Li, «Indoor mm-Wave Channel Measurements: Comparative Study of 2.9 GHz and 29 GHz,» Qualcomm R&D, Bridgewater, NJ, USA.
- [6] S. Hur, Y.-J. Cho, T. Kim y J. Park, «Millimeter-wave Channel Modeling based on Measurements in In-building, Campus and Urban Environments at 28 GHz,» Samsung Electronics, Korea y KAIST (Korea Advanced Institute of Science and Technology), Korea.
- [7] C. Oestges, «Experimental Validation of Ray-Tracing at 12 and 30 GHz,» ICTEAM, Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, BELGIUM.
- [8] B. Langen, G. Lober y W. Herzig, «Reflection and transmission behaviour of building materials at 60 ghz,» Deutsche Aerospace 89070 Ulm, Germany.
- [9] M. Kyrö, V. Semkin y V.-M. Kolmonen, «Empirical Characterization of Scattering Pattern of Built Surfaces at mm-Wave Frequencies,» Aalto University School of Electrical Engineering, SMARAD Centre of Excellence, 2013.
- [10] A. Maltsev, A. Pudeyev, I. Karls, I. Bolotin, G. Morozov, W. Keusgen, R. J. Weiler, M. P. M. Danchenko y A. Kuznetsov, «Quasi-Deterministic Approach to MmWave Channel Modeling in the FP7 MiWEBA Project.,» Wireless Communications and Networks, Fraunhofer Heinrich Hertz Institute, Germany.
- [11] E. Semaan, F. Harrysson, A. Furuskär y H. Asplund, «Outdoor-to-Indoor Coverage in High Frequency Bands,» Ericsson Research, Ericsson AB, Sweden.
- [12] J. P. García, J. M. M. García-Pardo y L. J. Llácer, Sistemas de Comunicaciones Móviles, Universidad politécnica de Cartagena, 2010.
- [13] M.-T. Martínez-Ingles *, J. Pascual-García *, J.-V. Rodríguez *, J.-M. Molina-García-Pardo *, L. Juan-Llácer *, D. P. Gaillot +, M. Liénard + y P. Degauque +, «Indoor radio channel characterization at 60 GHz,» * Information Technologies and Communications Department, Universidad Politécnica de Cartagena, Spain; + Telecommunication, Interference and Electromagnetic Compatibility Research Group, University of Lille, Villeneuve d'Ascq, France., 2013.
- [14] M.-T. Martínez-Ingles, J.-V. Rodríguez, J.-M. Molina-García-Pardo, J. Pascual-García y L. Juan-Llácer, «Multiple-Cylinder Diffraction Measurements at 60 GHz,» Universidad Politécnica de Cartagena, Dpto. Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, Cartagena, Murcia, Spain., 2013.
- [15] METIS, «Initial channel models based on measurements,» 2014.
- [16] H. Mokhtari y P. Lazaridis, «Comparative Study of Lateral Profile Knife-Edge Diffraction and Ray Tracing Technique Using GTD in Urban Environment,» Antennas and Propagation

Laboratory, RF Department, TDF-C2R Broadcasting and Radiocommunications Research Center 1, 57078 Metz Cedex 3, France, 1999.

- [17] M. Jacob #, S. Priebe #, A. Maltsev *, A. Lomayev *, V. Erceg + y T. Kürner #, «A Ray Tracing Based Stochastic Human Blockage Model for the IEEE 802.11ad 60 GHz Channel Model,» # Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Germany; * Intel Corporation, Nizhny Novgorod, Russia; + Broadcom Corporation, San Diego, USA, 2011.
- [18] M. Jacob +, S. Priebe +, T. Kürner +, M. Peter +, M. Wisotzki +, R. Felbecker + y W. Keusgen *, «Fundamental Analyses of 60 GHz Human Blockage,» + Technische Universität Braunschweig Braunschweig, Germany; * Fraunhofer Heinrich Hertz Institute Berlin, Germany 2, 2013.
- [19] M. Jacob +, S. Priebe +, T. Kürner +, M. Peter +, M. Wisotzki +, R. Felbecker + y W. Keusgen *, «Extension and Validation of the IEEE 802.11ad 60 GHz Human Blockage Model,» + Technische Universität Braunschweig Braunschweig, Germany;* Fraunhofer Heinrich Hertz Institute Berlin, Germany, 2013.
- [20] S. Hur, Y. Chang, B. Kim y J. Park, «mmWave Channel Modeling Based on 3D Ray-Tracing in Urban Environments,» DMC R&D Center, Samsung Electronics.
- [21] Y. Haibing, «Towards Low-Cost Gigabit Wireless Systems at 60 GHz,» 2008.
- [22] IEEE, «802.11ad- Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Amendment 3: Enhancements for Very High Throughput in the 60 GHz Band,» 2012.
- [23] IEEE, «802.15.3c- Wireless medium access control and physical layer specifications for high rates wireless personal area networks,» 2009.
- [24] H. Xu, V. Kukshya y T. S. Rappaport, «Spatial and Temporal Characteristics of 60-GHz,» 2002.
- [25] D.-J. Jung, J. N. Hansen y K. Chang, «60 GHz Dipole Antenna For Short Range Indoor,» Department of Electrical and Computer Engineering, Texas A&M University, 2012.
- [26] H. Lee *, J. Bok *, B. G. Jo +, G. H. Baek + y H.-G. Ryu *, «Indoor WPAN Communication System Using 2-Dimensional Array Antenna in 60GHz Frequency Band,» + Satellite Communication Group, Agency for Defense Development (ADD), Daejeon, Korea;* Department of Electronic Engineering Chungbuk National University Cheongju, Korea, 2012.
- [27] M. Kyrö *, D. Titz+, V.-M. Kolmonen*, S. Ranvier *, C. Luxey +, P. Pons # and P. Vainikainen *, «5 x 1 Linear Antenna Array for 60 GHz Beam,» * Aalto University School of Electrical Engineering, Department of Radio Science and Engineering, SMARAD;+ LEAT-CREMANT-CNRS, University of Nice-Sophia-Antipolis;# LAAS-CNRS, University of Toulouse, 2011.
- [28] W. Feng, Z. Xiao, D. Jin y L. Zeng, «Circular-Antenna-Array-Based Codebook Design,» Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China, 2013.

- [29] C. Estaño, K. Dombrowski, V. Brankovi y D. Radovi, «Antenna Solutions for UWB Communication Devices in 60GHz Range,» TES Electronic Solutions GmbH, Zettachring 8, Stuttgart, 70567, Germany, 2010.
- [30] J. Wang, Z. Lan, C.-S. Sum, C.-W. Pyo, J. Gao y T. Baykas, «Beamforming Codebook Design and Performance Evaluation for 60GHz Wideband WPANs,» National Institute of Information and Communication Technology (NICT), Japan, 2009.
- [31] I. E. Telatar y D. N. C.Tse, «Capacity and Mutual Information of Wideband Multipath Fading Channels,» 2000.
- [32] J.-V. Rodríguez, J.-M. Molina-García-Pardo y L. Juan-Llácer, «UTD-PO Formulation for the Multiple-Diffraction of Spherical Waves by an Array of Multimodeled Obstacles,» Departamento de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, Universidad Politécnica de Cartagena, 30202 Cartagena, 2009.
- [33] J. Lu, D. Steinbach, P. Cabrol, P. Pietraski y R. V. Pragada, «Propagation characterization of an office building in 60 ghz,» USA, 2014.
- [34] G. Jing, L. Keren, S. Tomoaki, W. Junyi, H. Hiroshi y K. Shuzo, «Implementation Considerations of Patch Antenna Array for 60GHz Beam Steering System Applications,» New Generation Wireless Communications Research Center, National Institute of Information and Communications Technology, 2009.
- [35] O. Hashimoto, H. Higashi y K. Orikabe, «Measurement of Complex Permittivity of Radome Material at 60 GHz Frequency Band,» Aoyamagakuin University, Tokyo, Japan, 1999.
- [36] E. Bonek, «MIMO Propagation Channel Modeling,» Institute of Telecommunications Technische Universität Wien, 2013.
- [37] wikipedia.org, «Physical Optics,» 2014. [En línea]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Physical_optics. [Último acceso: 2015].
- [38] Altair Engineering, Inc, «Numerical Methods - FEKO,» 2015. [En línea]. Available: https://www.feko.info/product-detail/numerical_methods. [Último acceso: 2015].
- [39] EM Software & Systems-S.A., «FEKO 7.0 User's Manual,» 2014.