

# **1**

## **GENERALIDADES**

## 1.1. Introducción

En este trabajo se presenta una nueva forma de estimar los sistemas MIMO en ambientes de interior. Se utiliza la técnica de rayos óptica del lanzamiento de rayos bajo el método de fuerza bruta. Dicha técnica no ha sido ampliamente empleada debido a los grandes consumos computacionales, sin embargo, para resolver este problema se propone el uso de los motores de juego y la aceleración por hardware mediante tarjetas gráficas. Adicionalmente, se verifica la precisión de la solución presentada, evaluando las frecuencias a ser empleadas para el 5G móvil.

## 1.2. Motivación

La masificación en el acceso a la información multimedia a través de aplicaciones y servicios obliga a la siguiente generación de comunicaciones móviles a presentar avances tecnológicos con rapidez [1], [2]. Esto significa aumentar la eficiencia del canal inalámbrico mediante la transmisión en el menor tiempo y con una calidad aceptable al mayor número de usuarios posibles. Bajo el supuesto de ambientes con alta dispersión (*Rich Scattering*), un sistema de banda estrecha de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) puede aumentar significativamente la capacidad del canal resultante sobre el sistema de antena simple tradicional [3]. Para los sistemas de 5G móviles se propone MIMO masivo como tecnología para mejorar la eficiencia espectral [4]. El rango de frecuencias sugerido por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) donde se implementará el 5G móvil contempla un amplio set de rangos de frecuencias entre 24 GHz y 86 GHz [5].

Para evaluar la eficiencia de implementaciones tecnológicas es necesario estimar el comportamiento del canal de radio a través de modelos determinísticos o estocásticos [6]. Los modelos estocásticos usan una función de distribución probabilística y descuidan algunos efectos del canal debido a las antenas o al tipo y número de dispersores en el escenario a evaluar. En cambio, los modelos deterministas son adecuados en los diferentes ambientes con dispersores de tamaño considerable, debido a sus predicciones exactas y verificables [7]. Los métodos computacionales han presentado gran influencia en la predicción de parámetros de canal inalámbrico, y como resultado, la técnica de rayos ópticos es la de mayor precisión [8]. Hasta ahora se han implementado con mayor eficiencia y precisión, la técnica del trazado de rayos (RT, *Ray Tracing*) basado en el método de imágenes [9] y la técnica de lanzamiento de rayos (RL, *Ray Launching*) que emplea el algoritmo de fuerza bruta [12]–[14].

Sin embargo, computacionalmente, la primera técnica está limitada a un escenario simplificado debido al número de fuentes secundarias que se producen por los fenómenos de reflexión múltiple y difracción. En cuanto a la segunda técnica, su precisión está en función del ángulo de resolución de disparo. Los rayos producidos inicialmente y los generados como una fuente secundaria producto del principio de Huygens–Fresnel, aumentan exponencialmente el número de caminos a analizar. Para que el lanzamiento de rayos sea una estrategia práctica, precisa y eficiente computacionalmente, es necesario recurrir al uso de motores de juego y aceleración por hardware [15], [16], pero su estudio se ha limitado a la estimación de canales inalámbricos de un transmisor y un receptor (SISO, *Single input single output*) en ondas decimétricas.

Actualmente las limitaciones computacionales de las técnicas de rayos ópticos imposibilitan su utilización en herramientas de planificación y optimización de los futuros sistemas MIMO masivo y ondas milimétricas. Este hecho provoca que instrumentos útiles como los mapas de canal no hayan sido empleados hasta el momento en la planificación de los mencionados sistemas. Los mapas de canal son presentaciones en códigos de colores que muestran las características de un canal dentro de un mapa geográfico [17] y son ampliamente usados como una aplicación computacional de planificación y optimización [18], [19]. A pesar de los usos y aplicaciones, publicaciones recientes por Weng et al en [19], [20], Suzuki [18] y Zhu et al en [21] muestran que los mapas de canal aún no son usados en el tratamiento de sistemas MIMO masivo y ondas milimétricas debido al alto consumo de recurso computacional.

### 1.3. Relevancia

El rango de frecuencias de las ondas milimétricas es estudiado como alternativa para la implementación de la comunicación móvil de 5G. Especialmente el rango de 57 a 66 GHz es un espectro libre de licenciamiento y con gran tasa de velocidad (algunos Gigabits por segundo), lo que hace a la banda propuesta por el ITU como la mejor opción para pequeñas áreas de cobertura.

En este trabajo se presenta una nueva forma de estimación paramétrica para canales inalámbricos en sistemas MIMO que operan en ondas milimétricas, que combina el software de motores de juego con la aceleración por hardware y métodos heurísticos que obtienen rangos de precisión importantes.

La estimación paramétrica se emplea para obtener un mapa de capacidad de canal. Su función principal es permitir la planificación y la optimización de redes inalámbricas en un escenario bien definido, en este caso, para aplicaciones de 5G móvil. Al obtener la respuesta en frecuencia para un conjunto de transmisores y receptores dados, es posible predecir la capacidad de canal para posiciones específicas y así, elegir la mejor opción para el escenario bajo estudio. El efecto sobre la precisión a causa de los parámetros constitutivos de los materiales, el número de antenas en transmisor y receptor, el número de eventos de reflexión, difracción y reflexión difusa, así como sus combinaciones, también fueron materia de estudio.

#### 1.4. Contribuciones

Las contribuciones que se lograron con este trabajo y respecto al avance en el estado actual en la estimación de canal inalámbrico son las siguientes:

1. Se desarrolló una herramienta computacional que permita estimar los parámetros de canal inalámbrico en un amplio espectro, preciso y confiable, que incluye las ondas milimétricas, aplicable a tecnologías actuales (MIMO).
2. Se empleó en conjunto la aceleración de hardware, el software libre de motor de juegos implementando el lanzamiento de rayos y algoritmos heurísticos para obtener un mapa de canal para 5G de comunicaciones móviles dentro de un escenario bien definido.
3. Se obtuvo una estimación paramétrica que atiende el principio de reciprocidad.
4. Se aportaron simulaciones de gran precisión para modelar canales en 5G que fueron comparadas con campañas de mediciones y con otra estrategia de rayos ópticos, de donde se obtuvieron mejoras considerables en tiempo computacional, precisión y nivel de detalle del escenario.
5. Permitió el estudio de las contribuciones de la reflexión difusa en las ondas milimétricas.

#### 1.5. Preguntas de Investigación

¿En qué medida las herramientas de lanzamiento de rayos en 3D pueden modelar, de forma confiable, el canal radio y reducir la dependencia de medidas en la planificación de los futuros sistemas 5G?

¿En qué situaciones es más rentable el lanzador de rayos que otras estrategias de rayos ópticos?

¿Es posible extender las técnicas de modelado de canal basadas en la teoría uniforme de la difracción (UTD, *Uniform Theory of Diffraction*) y lanzado de rayos, de sistemas SISO a sistemas MIMO y MIMO masivo?

¿Se pueden usar herramientas de trazado de rayos para optimizar el canal y la capacidad de un sistema 5G desde su planificación?

## 1.6. Hipótesis

Una simulación de mapa de capacidad de canal que utilice una representación que contenga la suficiente información geoespacial y los parámetros constitutivos de los dispersores mejorará su precisión, permitirá la planificación y optimización de sistemas móviles 5G.

## 1.7. Objetivos

### 1.7.1. Objetivo General

Estimar la capacidad de sistemas MIMO en ondas milimétricas, empleando el concepto de mapa de canal, software libre de motores de juego, aceleración por hardware y técnicas de lanzado de rayos.

### 1.7.2. Objetivos específicos

- Obtener modelos geoespaciales de un escenario de prueba en tres dimensiones a través de herramientas gráficas que permitan la inclusión de parámetros físicos de los materiales que caracterizan los dispersores.
- Modelar el comportamiento en tres dimensiones de las ondas electromagnéticas para sistemas MIMO y MIMO masivo en ondas milimétricas mediante la implementación de la UTD, técnicas de lanzado de rayos, motores de juego y aceleración por hardware.
- Proponer un mapa de capacidad de canal a partir de los resultados de la simulación.

- Verificar la precisión de los resultados obtenidos mediante la comparación con la técnica de trazado de rayos y campañas de medición.

## 1.8. Organización del libro

En esta sección se presenta cómo está estructurado el contenido de este libro. En el capítulo 1 se describen las generalidades; en el capítulo 2, las bases teóricas compuestas por las definiciones fundamentales y el marco de antecedentes en donde se realiza la revisión al estado actual de la temática. En el capítulo 3 se describe el modelado del escenario y del canal, así como el método para elegir las plataformas de hardware y software. En el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos desde la simulación con el motor de juegos en ondas milimétricas (alrededor de 60 GHz). Estos resultados son comparados con campañas de mediciones y, en el caso de las ondas milimétricas, también se comparan con otra herramienta computacional desarrollada por la UPCT. Finalmente, se llega a las conclusiones de este trabajo en el capítulo 5 y los trabajos futuros en la sección 6.

# **2**

## **BASES TEÓRICAS**

Se revisan los elementos conceptuales que permiten abordar la temática presentada. A continuación, se presentan los aspectos relacionados con la técnica para modelado de canal y los parámetros de canal multicamino.

## 2.1. Ondas milimétricas

Las ondas en alta frecuencia están dadas como la solución para la siguiente generación de comunicaciones inalámbricas de corto alcance y muy altas velocidades [22]. La banda de frecuencias con mayor opción es la de ondas milimétricas que se encuentra libre de licenciamiento (ISM, *Industrial, Scientific and Medical Band*), y alrededor de 60 GHz. Existen rangos definidos con aplicaciones estandarizadas como lo son IEEE-802.15.3 c [23] y IEEE-802.11ad [24].

El 14 de julio, la FCC anunció la atribución de las bandas de 28GHz, 37GHz, 39GHz y 64-71GHz en el plan de nominado *Spectrum Frontiers*, con el ánimo de ser pionero en 5G. Las reglas publicadas crean un nuevo servicio denominado *Upper Microwave Flexible Use* en las bandas licenciadas 28 GHz (27.5-28.35 GHz), 37 GHz (37-38.6 GHz), y 39 GHz (38.6-40 GHz), y en la banda no licenciada de 64-71 GHz.

En esta frecuencia la atenuación por pérdidas de propagación en el espacio libre es muy alta [25]. Sin embargo, esto es posible compensarlo con antenas de alta directividad y haciendo que el aporte principal de energía en el receptor sea por la componente de línea de vista. Sin embargo, las contribuciones debidas a la reflexión, difracción y difusión se deben tener en cuenta [26]. Debido a estas consideraciones, las técnicas de modelado de canal basada en rayos ópticos son apropiadas para tratar estas frecuencias. Las características dieléctricas de los materiales que conforman el espacio de propagación aportarán mayor precisión en el modelo [27].

## 2.2. Trazado de rayos óptico

Es una técnica determinista utilizada para caracterizar canales de radiocomunicaciones basada en la Teoría de la Óptica Geométrica (GO, *Geometrical optics*) y la UTD [28], [29]. El trazado de rayos considera fenómenos de reflexión que solucionan la GO y difracción tratados por la UTD, en superficies planas. Esta técnica es válida en escenarios urbanos de propagación y permite expresar el campo de ondas con un conjunto de rayos, cada uno correspondiendo a la conectividad lineal de dos terminales. La técnica de rayos ópticos posee principalmente dos métodos llamados: el método de trazado de rayos (RT, *ray tracing*) y el método de

lanzamiento de rayos (RL, *ray launching*) [30]. El primero se utiliza generalmente en escenarios interiores con geometrías de baja complejidad y un número pequeño de reflexiones. En cambio, el lanzamiento de rayos es empleado en entornos con geometrías complejas y pueden considerarse múltiples reflexiones y difracciones o combinaciones de ellas. La ventaja de utilizar un trazado de rayos es su característica de distinguir entre diferentes caminos de propagación, lo que permite estimar los parámetros de canal, ya sea para banda angosta o banda ancha, como también la caracterización espacial y temporal.

### 2.3. Método de imágenes

La estrategia de trazado de rayos está basada en la teoría de imágenes, se utiliza generalmente en escenarios interiores con geometrías de baja complejidad y número pequeño de reflexiones [31], [32]. Consiste en conseguir todas las imágenes del receptor sobre todas las superficies de los dispersores con el fin de obtener las reflexiones y difracciones simples, múltiples y las combinaciones entre ellas. Luego, cada una de esas imágenes constituyen una fuente secundaria de radiación para repetir el proceso del análisis de reflexión y difracción con las nuevas imágenes. Sí se asume  $N$  superficies o caras reflectoras, existirán igual número de imágenes del transmisor. Para las reflexiones de segundo orden se tendrá un número igual a  $N(N - 1)$ , para el tercer orden será  $N(N - 1)(N - 1)$  y así, sucesivamente [33].

Un método propuesto para obtener las reflexiones es definir el orden, luego graficar las fuentes virtuales o imágenes y obtener las trazas descartando aquellas que no pertenezcan al dominio de la reflexión [34]. A modo de ejemplo, en la Figura 2.1 se ilustran las componentes de segundo orden.

En primera instancia se obtiene el orden, el cual sería para este ejemplo  $N = 2$  y así existirán  $N(N - 1) = 4$  imágenes. Luego se realiza un proceso de recorrido inverso desde la fuente con mayor cantidad de subíndices hasta llegar a la fuente.

Para ubicar los subíndices se inicia por el número de interfaz con la cual se refleja y se va incrementando de acuerdo al orden. La fuente  $S_{12}$  se genera como resultado de la imagen de  $S$  en la interfaz 1, lo que da lugar a la fuente  $S_1$  y posteriormente esta se refleja sobre la interfaz 2. Para ilustrar el proceso de recorrido inverso, se parte del receptor y se une con una línea a  $S_{12}$ . Como la línea pasa por la interfaz, la reflexión tendrá lugar. Ahora, el punto de intersección  $x$  es el nuevo receptor. Se une el nuevo receptor  $x$  con la fuente siguiente en recorrido inverso, es decir  $S_1$ . De igual forma, la reflexión existe ya que se intersecta en un punto de la interfaz 1. Ahora

el nuevo receptor es el punto  $y$ . Se traza una línea desde  $y$  en corrida inversa a la siguiente fuente que es  $S$ . Se finaliza el proceso al llegar a la fuente real. De la gráfica es posible revisar que la fuente  $S_{21}$  no es una fuente válida. El orden de trazado de rayos afecta fuertemente el proceso computacional y lo vuelve incalculable. La transmisión del rayo a través de una cara es posible si las características del material permiten que llegue con la suficiente potencia para ser considerado.

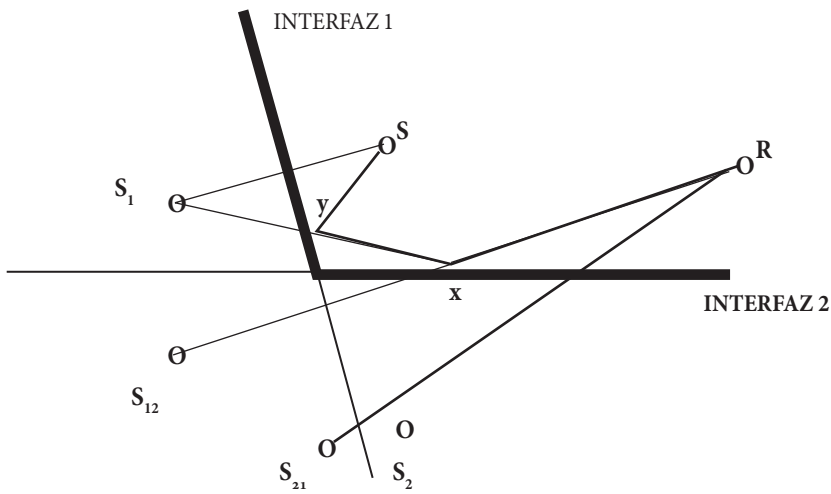


Figura 2.1.  
 Segundo orden de reflexión para la fuente  $S$  y el receptor  $R$ .

## 2.4. Método de fuerza bruta

La técnica de disparo y rebote de rayos (SBR, *Shooting and Bouncing rays*) [35] parte del lanzamiento de miles de rayos desde la antena transmisora, separados por una resolución angular sólida, trazando las trayectorias de los mismos; lo que permite observar si golpean con algún objeto del entorno o si llegan a la antena receptora. Cuando el rayo golpea con algún obstáculo ocurre reflexión, refracción o desvanecimiento, difracción o dispersión dependiendo de la geometría y las propiedades eléctricas de los objetos. Debido a la cantidad de rayos generados, es un método más preciso que el método de imágenes ya que permite la investigación de la influencia de todos los dispersores involucrados en el escenario a costa del incremento de recurso computacional.