



Universidad
Politécnica
de Cartagena

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

Análisis de un canal MIMO en las bandas de 60 y 94 GHz mediante un trazador de rayos.



AUTOR: Gabriel Amador Sánchez

DIRECTOR: Juan Pascual García

CO-DIRECTOR: José María Molina

Índice

1. Introducción.....	2
1.1 Planteamiento inicial del proyecto.....	2
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Fases del proyecto.....	3
2. Estado del arte.....	4
2.1 Modelado de un canal radio.....	4
2.2 Ondas milimétricas.....	12
2.3 Clustering.....	16
3. Escenario de estudio y medidas realizadas.....	21
3.1 Escenario de estudio.....	21
3.2 Medidas realizadas.....	25
4. Metodología de análisis.....	29
4.1 Análisis de las medidas.....	29
4.2 Simulaciones con el trazador de rayos.....	33
5. Resultados obtenidos.....	44
5.1 Resultados para la banda de 94 GHz.....	44
5.2 Clustering de los resultados para la banda de 94 GHz.....	68
5.3 Resultados para la banda de 60 GHz.....	74
5.4 Clustering de los resultados para la banda de 60 GHz.....	98
5.5 Comparación entre las bandas de 94 GHz y 60 GHz.....	104
6. Conclusiones.....	107
7. Índice de figuras, gráficas y tablas.....	109
8. Bibliografía.....	115

1. Introducción.

A la hora de diseñar un sistema de comunicaciones inalámbrico es importante realizar un buen análisis de todos los elementos que pueden interferir en el mismo, ya que de esto dependerá la calidad y el rendimiento de dicho sistema. Estos elementos pueden ser sus parámetros de diseño, así como el estudio de las posibles interferencias del exterior. Una vez diseñado e implementado, se puede comprobar su correcto funcionamiento de distintas maneras, principalmente mediante campañas de medidas o simulaciones.

Una de las principales ventajas de las simulaciones es que permite ver el comportamiento del sistema de comunicación diseñado sin tener que llegar a implementarlo de forma real, con el correspondiente ahorro de costes y tiempo que conlleva.

Es importante tener en cuenta que la realización de las simulaciones depende de la exactitud y simplicidad del modelo de sistema usado. En concreto, para la simulación de un sistema de comunicación inalámbrico el modelo de canal debe reproducir fielmente los efectos de propagación que se generan, pero además debe ser sencillo de manera que no consuma excesivos recursos computacionales.

1.1 Planteamiento inicial del proyecto.

En el presente proyecto se va a realizar el análisis de un canal MIMO (Multiple Input Multiple Output) que producen un notable incremento en la capacidad del canal para las bandas de frecuencias de 94 y 60 gigahercios tanto de forma determinística como experimental. Para ello se partirá de unas medidas realizadas en una estancia determinada (el edificio del ELDI de la UPCT en concreto) para dichas bandas, y una vez obtenidos estos resultados se obtendrán los parámetros que permiten caracterizar dicho canal. Dichos parámetros son el perfil de retardo de potencia, el RMS delay spread, el máximo excess delay y las pérdidas de propagación entre otros. Al tratarse de un canal MIMO también es importante obtener la dispersión angular, los clusters y la correlación entre antenas. Dichos parámetros también han sido extraídos.

Una vez obtenidos dichos resultados se procederá a hacer uso de un trazador de rayos desarrollado en Matlab que permitirá simular el entorno de medidas usado anteriormente y mediante el cual obtendremos de nuevo dichos parámetros de caracterización, así como otros que son también de interés, como pueden ser el valor de los ángulos a la salida de los transmisores y de llegada a los receptores, la dispersión angular o el valor medio de los ángulos.

1.2 Objetivos.

Una vez hayan sido hechas las simulaciones con el trazador de rayos, si los parámetros obtenidos con las mismas coinciden de manera razonable con los de las medidas realizadas, se conseguirá tener un método o técnica de simulación que nos permitirá saber si el sistema de comunicación funciona sin necesidad de montarlo previamente, lo que permitirá un ahorro de costes y tiempo como se ha mencionado anteriormente.

1.3 Fases del proyecto

Para el correcto desarrollo del Trabajo Fin de Máster ha sido necesario organizar las tareas en distintas fases para conseguir un buen resultado final.

- **Fase 1:** Lectura y comprensión del ámbito del proyecto (apuntes, publicaciones, todos aquellos documentos relacionados con el proyecto en cuestión).
- **Fase 2:** A partir de una serie de campañas de medidas realizadas a 94 GHz (casos de polarización copolar vertical y horizontal) y 60 GHz (sólo polarización copolar vertical), analizar mediante Matlab los elementos que las componen para el posterior trabajo con las mismas.
- **Fase 3:** Obtención para las distintas polarizaciones que aparecen a 94 GHz una serie de parámetros de caracterización del canal, así como una serie de gráficas y figuras que aportan información adicional.
- **Fase 4:** Obtención de todos los parámetros y gráficas previamente mencionados para la campaña de medidas a 60 GHz.
- **Fase 5:** Comparativa de los diferentes resultados obtenidos a 94 GHz y 60 GHz.
- **Fase 6:** Comprensión y análisis del funcionamiento del trazador de rayos para así poder realizar las simulaciones, además de la actualización y mejoramiento del mismo durante el proceso de obtención de parámetros.
- **Fase 7:** Redacción de la memoria del proyecto.
- **Fase 8:** Lectura y defensa del proyecto.

2. Estado del arte.

En esta parte se tratarán los principales procedimientos que se utilizan para diseñar los sistemas de propagación, cómo se agrupan los parámetros del canal según determinados criterios o qué sistemas de medida se utilizan. También se va a comentar los distintos mecanismos y efectos que pueden afectar a la transmisión de una señal en una comunicación móvil.

2.1 Modelado de un canal radio.

Un canal de transmisión puede ser estudiado de distintas formas dependiendo de cómo se transmitan las ondas a través del mismo. Esto implica que cuando el canal de transmisión es el aire, el modelado de canal que lo caracteriza es diferente a cuando lo hace a través de medios sólidos como pueden ser los cables o las guías de onda. Para ambos medios de propagación, los elementos más importantes a tener en cuenta son la distancia entre el transmisor y el receptor, así como el ruido que se introduce en el sistema y la atenuación debido a la distancia recorrida.

Si bien se mantiene la dependencia respecto a la distancia, la relación entre ambos casos es distinta, y a diferencia del modelo de propagación a través de medios sólidos, para el caso de medios de comunicación inalámbricos el ruido que se introduce en el canal no depende del camino por el que haya pasado la señal desde el transmisor hasta el receptor. Se va a ver a continuación como realizar el modelado de un canal radioeléctrico.

Para empezar, un canal sin distorsión y con una única réplica se modela como un sistema lineal invariante en el tiempo causal, cuya respuesta al impulso es la mostrada en (1).

$$H_C(f) = k \cdot e^{-2\pi f t_d} \cdot \Pi\left(\frac{f}{2B}\right) \quad (1)$$

En dicha fórmula B es el ancho del canal, k es un factor multiplicativo y t_d un retardo finito. Luego, la segunda componente del modelo corresponde al ruido introducido en el canal, que se modela como aditivo [1].

Atenuaciones.

Cuando el medio de comunicación es el aire se suele denominar a la atenuación como pérdida de camino, la cual se va a denominar $L(x)$. La atenuación o pérdida de camino corresponde a la relación entre la potencia de la señal transmitida (P_{tx}) y la potencia de la señal recibida (P_{rx}) a una distancia x .

$$L(x) = \frac{P_{tx}}{P_{rx}(x)}, \text{ que en dB queda como } L^{dB}(x) = P_{tx}^{dB} - P_{rx}^{dB}(x)$$

Las pérdidas de camino pueden ser también expresadas mediante (2).

$$L(x) = \left(\frac{4\pi x}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{4\pi f x}{c}\right)^2 \quad (2)$$

Siendo λ la longitud de onda, f la frecuencia y c la velocidad de la luz. Esto es para el caso de una onda directa, si por ejemplo la onda es reflejada hay que añadir un coeficiente de reflexión. Al poner dicha expresión en dB la relación queda como se muestra en (3).

$$L^{dB}(x) = 20 \log_{10}(4\pi) + 20 \log_{10}(x) - 20 \log_{10}(\lambda) \quad (3)$$

Esta relación es válida además para el diseño de radioenlaces cuando se cumple lo que se denomina línea de visión o LOS (line of sight). Se dice que hay línea de visión entre dos puntos cuando no hay obstáculos en la línea recta que los une, en este caso entre transmisor y receptor. La condición de que el radioenlace sea viable es algo más compleja que el que sólo haya LOS, ya que debe estar despejada una región mayor denominada primera región de Fresnel. Dicha región se muestra en la figura 1.

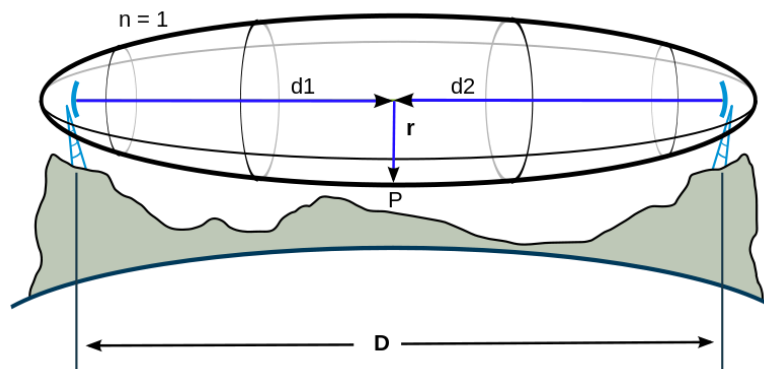


Figura 1. Representación de la primera zona de Fresnel [2].

La primera región de Fresnel se calcula mediante la ecuación en (4).

$$r_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (4)$$

Donde r_n es el radio del área de Fresnel en metros ($n=1, 2, 3\dots$), d_1 es la distancia desde el transmisor al centro del elipsoide en metros, d_2 es la distancia desde el centro del elipsoide al receptor en metros y λ es la longitud de onda de la señal transmitida.

Dada la complejidad que implica modelar la propagación en el aire para distintos ambientes, donde diversos mecanismos (reflexión, distorsión, absorción) se producen simultáneamente, existe un modelo simplificado que contempla distintos escenarios. A través de desarrollo teórico y medidas de campo se ajusta un modelo general de la siguiente forma (5).

$$L(x) = L(x_0) \cdot \left(\frac{x}{x_0}\right)^\gamma \quad (5)$$

Donde x_0 una distancia de referencia donde la atenuación es $L(x_0)$. En dB la relación se expresa de la siguiente forma (6).

$$L^{dB}(x) = L^{dB}(x_0) + 10 \cdot \gamma \cdot \log_{10} \left(\frac{x}{x_0}\right) \quad (6)$$

Este modelo simplificado se ajusta a distintos ambientes mediante el ajuste de medidas de campo para determinar el γ más adecuado en cada caso.

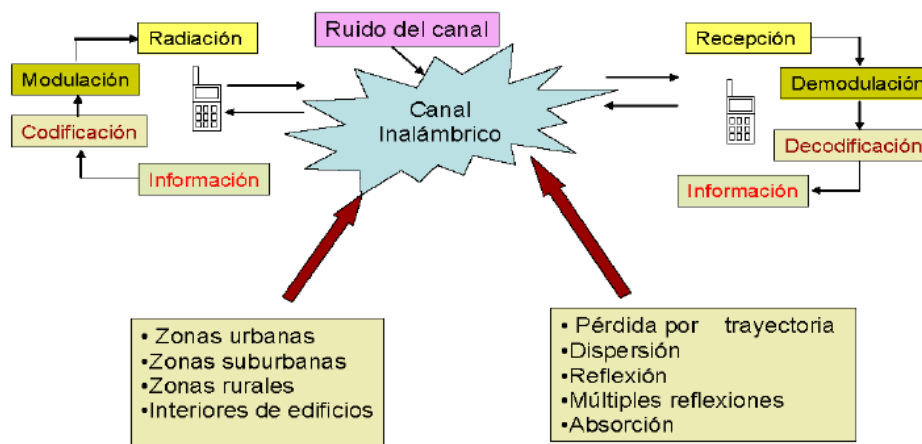


Figura 2. Fenómenos considerados al modelar un canal radioeléctrico [3].

Ruido.

Otro parámetro importante a tener en cuenta en el modelado de un canal es el ruido. El ruido que se introduce en una comunicación por aire está determinado por las condiciones en el receptor. Un modelo típicamente utilizado corresponde al ruido AWGN: una variable aleatoria de media nula y potencia σ^2 , con densidad espectral de potencia constante $\eta/2$. Si se considera un ancho de banda de transmisión B , se tiene que la potencia de ruido en recepción es la mostrada en (7).

$$\sigma^2 = \frac{\eta}{2} \cdot 2B = \eta B \quad (7)$$

Reflexión.

La reflexión de una onda electromagnética es el rebote que experimenta cuando llega a un obstáculo grande en relación a la longitud de onda, como una pared. Aunque el obstáculo absorba parte de la energía recibida (incluso vibrando si entra en resonancia) se produce también reflexión en la que se transmite de vuelta parte de la energía a las partículas del medio incidente. Para que exista reflexión el objeto contra el que choca la onda electromagnética debe tener propiedades electromagnéticas diferentes respecto al medio por el que se propaga la onda electromagnética incidente. Si el objeto es un dieléctrico parte de la energía se refleja en el primer medio y parte se transmite al segundo medio. Si el objeto es un conductor no aparece ninguna onda transmitida y sólo existe una onda reflejada.

Si se representa la señal como un frente de ondas plano llegando a una superficie horizontal con un cierto ángulo i de incidencia el cual se mide con respecto a la dirección normal N , de acuerdo con el principio de Huygens, cuando el frente de ondas empieza a tocar la superficie, el punto A se convierte en un nuevo foco que emite ondas secundarias y según transcurre el tiempo y el frente AB va incidiendo, repiten este comportamiento todos los puntos de la superficie comprendidos entre A y C . El frente de ondas reflejado, DC , es el envolvente de las ondas secundarias que se han ido emitiendo durante un tiempo igual al periodo desde el tramo AC de la pared.

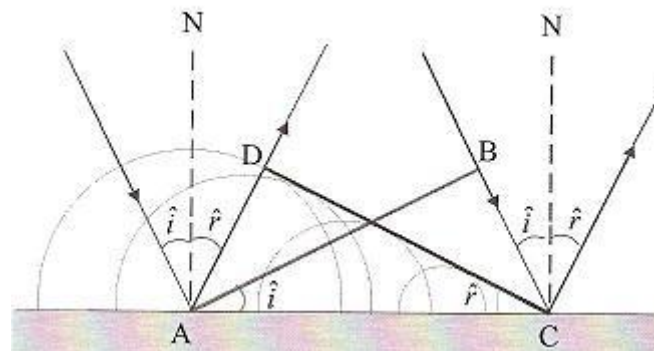


Figura 3. Reflexión de las ondas en una superficie plana [4].

Aplicando leyes de geometría elemental al proceso, se llega a la conclusión de que el ángulo de incidencia i es igual al ángulo de reflexión r , lo que se conoce como ley de la reflexión o reflexión especular.

En el caso de que la superficie no sea lisa, sino que sea irregular o presente rugosidades, el comportamiento de la onda electromagnética va a ser distinto. Es lo que se conoce como reflexión difusa o scattering.

Difracción.

La difracción es un fenómeno físico de las ondas que se basa en la desviación de estas al encontrar un obstáculo o al atravesar una rendija. La difracción ocurre en todo tipo de ondas. También sucede cuando un grupo de ondas de tamaño finito se propaga.

La difracción puede ser entendida a nivel fenomenológico usando el principio de Huygens, según el cual un frente de onda se puede visualizar como una sucesión de emisores puntuales, que reemiten la onda al oscilar, en respuesta a ella y contribuyen así a su propagación. Aunque cada oscilador individual genera una onda esférica, la interferencia de todas ellas da lugar a una onda plana que viaja en la misma dirección que la onda inicial. Cuando el frente de onda encuentra un obstáculo los emisores correspondientes al extremo del frente de onda obstruido no tienen otros emisores que interfieran con las ondas que ellos generan, y estas se aproximan a ondas esféricas o cilíndricas.

Para que se observe bien la difracción es necesario que la rendija sea del mismo tamaño o menor que la longitud de onda. Si es mayor la curvatura de los frentes de onda se produce únicamente en los bordes y puede llegar a no apreciarse como se muestra en la figura 4.



Figura 4. Para rendijas muy grandes no se aprecia la difracción [5].

A continuación en la figura 5 se muestra el aspecto de una onda difractada por una rendija y la distribución de la intensidad recibida a una cierta distancia detrás de ella.

En el primer caso el tamaño de la rendija es igual al de la longitud de onda. La difracción es total y la intensidad recibida en la pantalla disminuye lentamente desde el máximo situado enfrente de la rendija. En el segundo caso, el tamaño de la rendija es el triple que la longitud de onda. La difracción se produce cerca de cada uno de los bordes y a medida que nos alejamos de la rendija se observan perfiles de frentes de onda casi planos del tamaño de su abertura. Las ondas difractadas en las proximidades de cada borde se amortiguan y por ello la intensidad decae bruscamente desde el máximo.

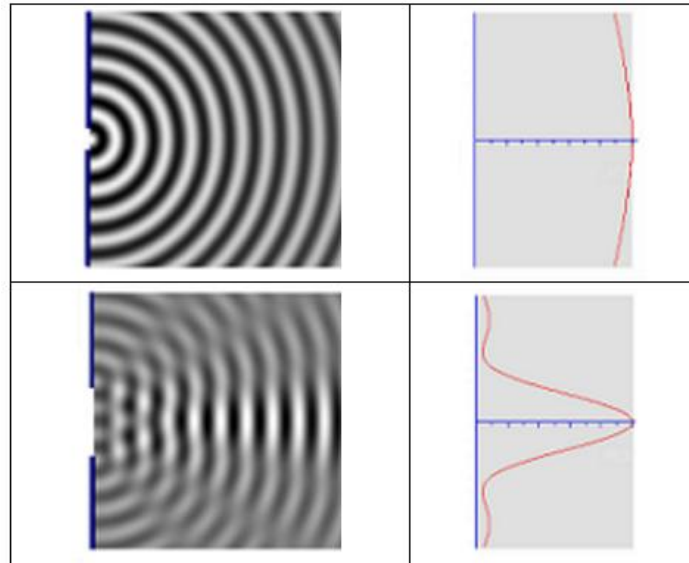


Figura 5. Difracción para distintos tamaños de rendija [6].

Refracción.

La refracción de una onda consiste en el cambio de dirección que experimenta cuando pasa de un medio a otro distinto. Este cambio de dirección se produce como consecuencia de la diferente velocidad de propagación que tiene la onda en ambos medios.

Para el caso de una onda plana desde un medio 1 a otro medio 2, suponiendo que la velocidad de propagación es menor en el segundo medio que en el primero, a medida que el frente de ondas AB va incidiendo en la superficie de separación, los puntos AC de esa superficie se convierten en focos secundarios y transmiten la vibración hacia el segundo medio. Debido a que la velocidad en el segundo medio es menor, la envolvente de las ondas secundarias transmitidas conforma un frente de ondas EC, en el que el punto E está más próximo a la superficie de separación que el B. En consecuencia, al pasar al segundo medio los rayos se desvían acercándose a la dirección normal N.

Mediante un razonamiento similar se comprueba que la desviación de la dirección de propagación tiene lugar en sentido contrario cuando la onda viaja de un medio donde su velocidad de propagación es menor a otro en el que es mayor.

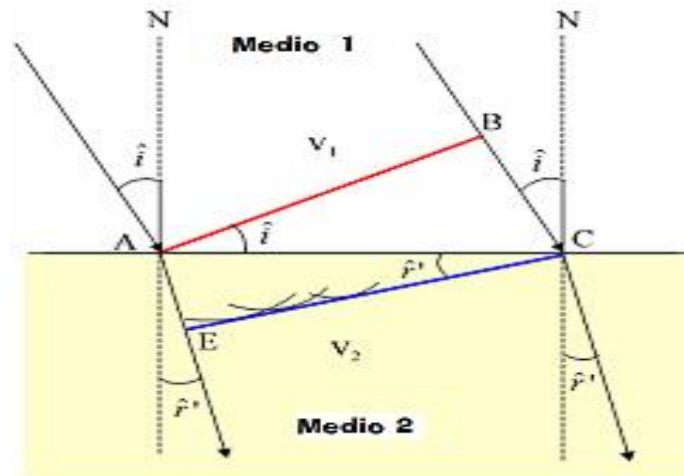


Figura 6. Refracción de la onda entre dos medios de propagación [7].

Normalmente la reflexión y la refracción se producen de forma simultánea. Cuando incide una onda sobre la superficie de separación entre dos medios, los puntos de esa superficie actúan como focos secundarios, que transmite la vibración en todas las direcciones y forman frentes de onda reflejados y refractados. La energía y la intensidad de la onda incidente se reparte entre ambos procesos (reflexión y refracción) en una determinada proporción.

Scatering.

La reflexión difusa o scattering es la reflexión de la onda desde una superficie, de tal forma que un rayo incidente es reflejado en muchos ángulos, en vez de en solamente un ángulo, como en el caso de la reflexión especular. Este fenómeno se produce cuando la onda electromagnética incide sobre objetos cuyo tamaño es pequeño comparado con la longitud de onda de la onda o cuando el número de obstáculos por unidad de volumen es alto, lo que normalmente se traduce en una superficie irregular.

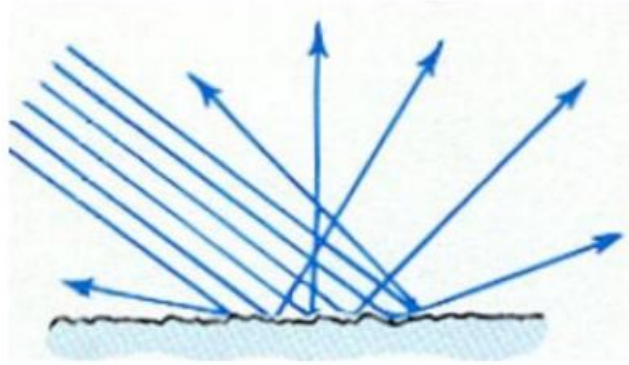


Figura 7. Reflexión difusa de una onda [8].

Para el caso de ondas electromagnéticas, el efecto de scattering más común es aquel que sigue el principio de dispersión de Rayleigh, que es la dispersión de la luz visible o cualquier otra radiación electromagnética por partículas cuyo tamaño es mucho menor que la longitud de onda de los fotones dispersados. Ocurre cuando la onda viaja por sólidos y fluidos transparentes, pero se ve con mayor frecuencia en los gases.

Canal de radio en interiores.

Para el caso de un canal interior se ha de tener en cuenta durante el modelado que varían ciertos parámetros. Además de la dispersión y difracción que se produce en los objetos cercanos de la estancia (al transmisor y receptor) y en las estructuras metálicas incrustadas en paredes y techos, el entorno de interiores se caracteriza por un gran número de rutas de propagación del transmisor al receptor, ya que sobre la señal transmitida se van a producir una serie de efectos que provocan la aparición de las ondas difundidas. Los efectos sobre la señal pueden ser atribuidos a la reflexión, difracción o difusión. Este amplio y variado número de rutas hace que el sistema sea clasificado como un entorno multitrayecto.

Al igual que para entornos exteriores, para el caso de entornos interiores en el receptor se van a recibir múltiples contribuciones o réplicas de la señal original transmitida. Cada réplica podrá sufrir diversos procesos de reflexión, difusión y difracción. Las réplicas viajarán por diferentes caminos de distinta longitud hasta llegar al receptor. Por tanto, alcanzarán al receptor con diferentes ángulos de incidencia, atenuaciones, desfases y retardos de propagación.

Todas las contribuciones se sumarán en el receptor, y dependiendo de la fase con la que lleguen se producirá interferencia constructiva si están en fase, aumentando la potencia recibida, o interferencia destructiva si están en contrafase, en cuyo caso sus amplitudes se restarán reduciendo la potencia recibida.

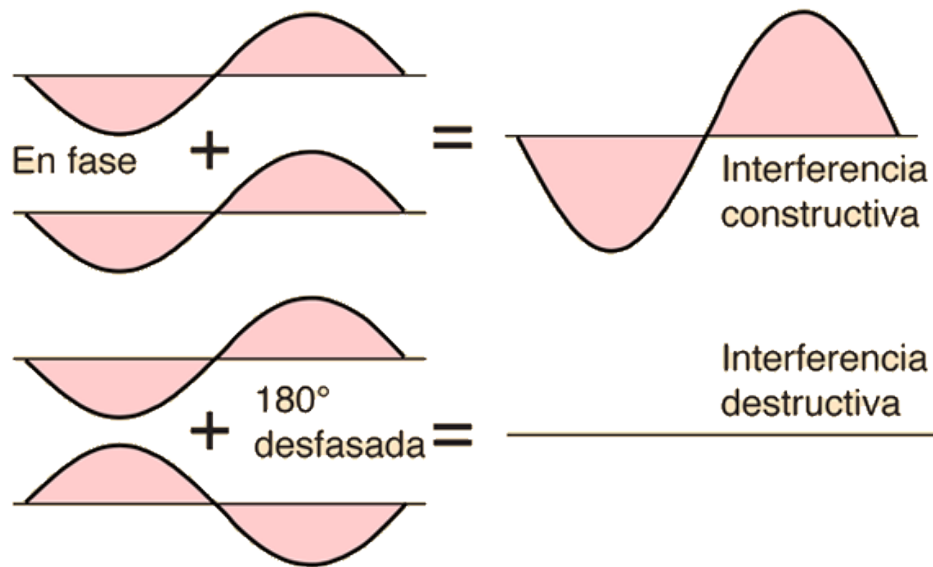


Figura 8. Efectos de fase constructiva y destructiva [9].

2.2 Ondas milimétricas.

Este tipo de ondas, también denominadas *milimetre band* o *milimetre wave* (mmW), son aquellas que van de los 30 a los 300 GHz, que se corresponde a la parte del espectro radioeléctrico llamada *Extremely High Frequency* (EHF). Dichas ondas recibieron este nombre por parte de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, y se encuentran entre la banda de súper alta frecuencia y la banda de infrarrojo lejano que también se conoce como la brecha terahercio (terahertz gap). Las ondas de radio en esta banda tienen longitudes de onda de diez milímetros a un milímetro.

En comparación con las bandas inferiores, las ondas de radio en esta banda tienen una alta atenuación atmosférica, es decir, son absorbidas por los gases de la atmósfera. Por lo tanto, tienen un alcance corto y sólo se puede utilizar para la comunicación terrestre a lo largo de un kilómetro. La absorción por la humedad en la atmósfera es significativa excepto en ambientes desérticos, y la atenuación por la lluvia (desvanecimiento de la lluvia) es un problema serio incluso en distancias cortas.

Sin embargo, el rango de propagación corto permite menores distancias de reutilización de frecuencia que las frecuencias más bajas. La longitud de onda corta permite que las antenas de tamaño pequeño tengan una anchura de haz pequeña, más directivas, aumentando aún más el potencial de reutilización de frecuencia.

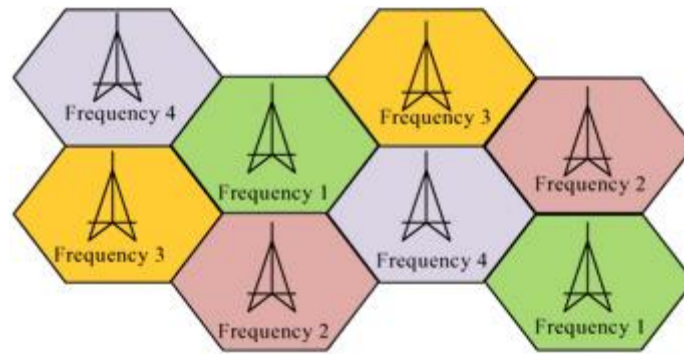


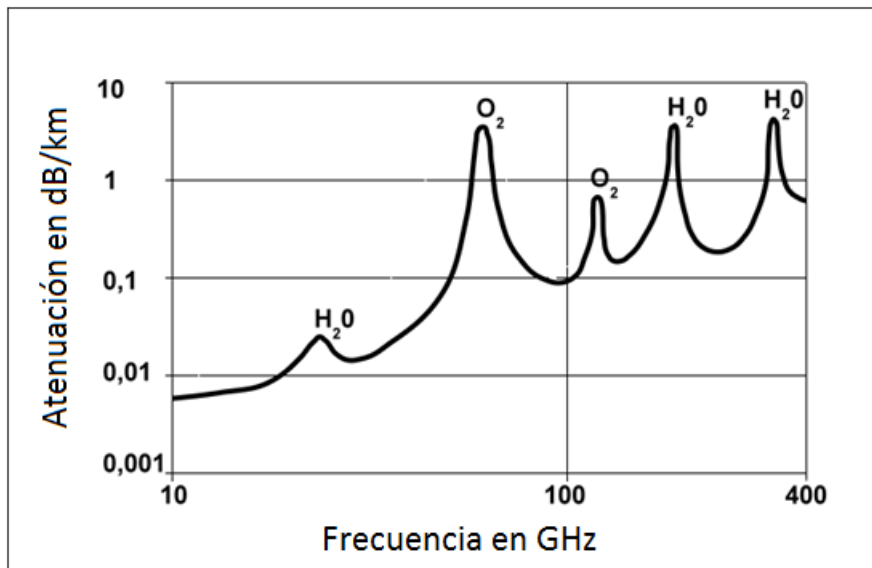
Figura 9. Ejemplo de sistema de reutilización de frecuencias [10].

Propagación de las ondas.

Las ondas milimétricas se propagan únicamente a través de trayectorias de visión directa (LOS). No son reflejadas por la ionosfera ni viajan a lo largo de la Tierra como ondas terrestres de menor frecuencia. A densidades de potencia típicas, son bloqueadas por las paredes de los edificios y sufren una atenuación significativa pasando a través de la vegetación. La absorción por los gases atmosféricos es un factor significativo en toda la banda EHF y aumenta con la frecuencia.

Cabe destacar que esta absorción es máxima para algunas líneas de absorción específicas, principalmente las de oxígeno a 60 GHz y vapor de agua a 24 GHz y 184 GHz. Para el caso de las frecuencias entre estos picos de absorción, las ondas milimétricas tienen menos atenuación atmosférica y mayor alcance, por lo que muchas aplicaciones utilizan estas frecuencias. Otro aspecto a tener en cuenta es que las longitudes de onda del milímetro son del mismo orden de tamaño que las gotas de lluvia, así que la lluvia causa una atenuación adicional debido a la dispersión (desvanecimiento de la lluvia) así como la absorción [11]. Las altas pérdidas de espacio libre y la absorción atmosférica limitan la propagación útil a unos pocos kilómetros.

Por lo tanto, las mmW son útiles para redes de comunicaciones densamente empaquetadas, tales como redes de área personal que mejoran la utilización del espectro mediante la reutilización de frecuencias, así como para radioenlaces en interiores.



Gráfica 1. Atenuación en dB/km en función de la frecuencia [12].

Las ondas milimétricas muestran también características de propagación "ópticas" y pueden ser reflejadas y enfocadas por pequeñas superficies metálicas y lentes dieléctricas de aproximadamente 5 a 30 cm de diámetro. Debido a que sus longitudes de onda son a menudo mucho más pequeñas que el equipo que las manipula, se pueden utilizar técnicas de óptica geométrica. La difracción es menor que en las frecuencias más bajas, aunque pueden difractarse en los bordes de aristas.

En las ondas milimétricas la longitud de onda es muy pequeña, lo que hace que las superficies puedan parecer más rugosas, lo cual en un principio aumenta la reflexión difusa. Sin embargo, con las medidas realizadas para el presente proyecto se ha observado que la difusión (scattering difuso) se reduce conforme aumenta la frecuencia. Cabe destacar también que debido a la propagación multicamino, en particular la reflexión de las paredes y superficies interiores, se provoca un grave desvanecimiento en la señal. Finalmente, el cambio de frecuencia Doppler puede ser significativo incluso a velocidades muy bajas.

Aplicaciones.

En el ámbito de las telecomunicaciones, esta banda tiene una gran variedad de aplicaciones. A continuación se enumeran algunas de ellas.

La banda que va de los 36 a los 40 GHz se utiliza para enlaces de datos de microondas de alta velocidad con licencia y la banda de 60 GHz puede utilizarse para enlaces de datos de corto alcance sin licencia (hasta unos 1,7 km) con tasas de datos de hasta 2,5 Gbit/s. Se utilizan comúnmente en terreno plano.

Las bandas de 71 a 76, 81 a 86 y 92 a 95 GHz también se utilizan para enlaces de comunicación punto a punto con ancho de banda alto. Estas frecuencias más altas no sufren absorción debido al oxígeno, pero requieren de una licencia de transmisión.

Una de las características de esta banda de frecuencias es que su uso actual es bajo, por lo que está disponible para su uso en una amplia gama de nuevos productos y servicios, incluyendo redes de área local inalámbrica de alta velocidad, punto a punto y acceso a Internet de banda ancha. WirelessHD es otra tecnología reciente que opera cerca de la gama de 60 GHz. Las características de las señales con diagrama de radiación en forma de lápiz es que son altamente direccionales y permiten que diferentes sistemas operen cerca uno del otro sin causar interferencia. Las aplicaciones potenciales incluyen sistemas de radar con muy alta resolución.

El estándar Wi-Fi IEEE 802.11ad opera en el espectro de 60 GHz (banda V) para lograr velocidades de transferencia de datos de hasta 7 Gbit/s.

Las bandas de ondas milimétricas también permiten realizar comunicaciones punto a punto, enlaces intersatélite y comunicaciones punto a multipunto. Hay planes tentativos para usar ondas milimétricas en futuros teléfonos móviles con protocolo 5G.



Figura 10. Sistema punto-multipunto que abarca diferentes servicios [13].

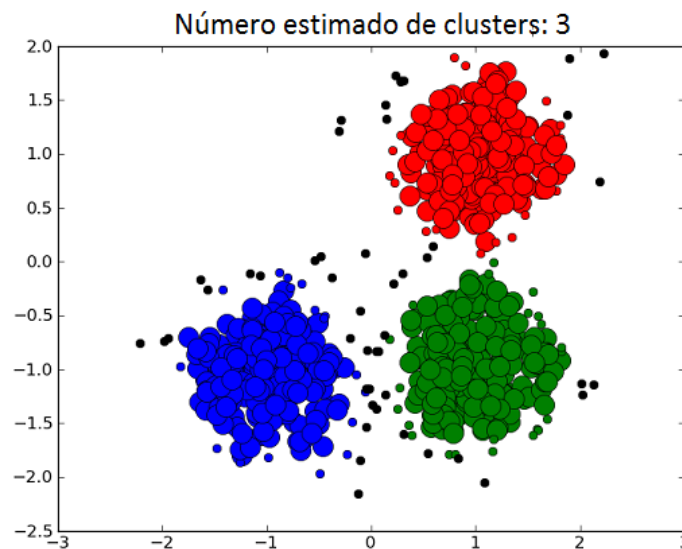
Las longitudes de onda más cortas en esta banda permiten el uso de arrays de antenas más pequeñas para lograr la misma alta directividad y alta ganancia que las mayores en bandas inferiores. La consecuencia inmediata de esta alta directividad, unida a las altas pérdidas de espacio libre en estas frecuencias, es la posibilidad de un uso más eficiente de las frecuencias para aplicaciones punto a multipunto. Dado que un mayor número de antenas altamente directivas pueden colocarse en un área determinada,

como puede ser en el caso de un canal MIMO, el resultado neto es una mayor reutilización de frecuencias y una mayor densidad de usuarios. Las altas pérdidas también permiten una reducción de las interferencias entre células que compartan recursos. La alta capacidad de canal utilizable en esta banda podría permitirle servir algunas aplicaciones que de otro modo utilizarían la comunicación de fibra óptica.

2.3 Clustering.

El análisis de grupos o clustering es una herramienta de análisis que intenta agrupar datos con propiedades similares en varios grupos. Esta técnica ha sido utilizada en muchos campos de investigación como la minería de datos, aprendizaje, análisis de imágenes, etc. Es particularmente útil en el campo de la radiopropagación inalámbrica. Por ejemplo, se usan los parámetros geométricos extraídos de los canales de radio MIMO, como pueden ser el Time-Of-Arrival (TOA) y Ángulo de Llegada / Salida (AOA / AOD) [14].

El desarrollo conjunto de técnicas de estimación paramétrica de alta resolución de sistemas avanzados como ESPRIT, SAGE, o más recientemente RiMAX también ha proporcionado una mejor comprensión de los mecanismos de propagación de los canales de radio.



Gráfica 2. Agrupamiento de datos similares en grupos o clusters [15].

Los pasos de la estimación del clustering se encuentran en el corazón de los últimos modelos de canales de radio que ahora asumen que los multipath components (MPC) pueden agruparse en grupos. Aunque en la última década se ha hecho un esfuerzo

considerable para mejorar el tratamiento matemático para la etapa de estimación, la agrupación se basa principalmente en técnicas más antiguas desarrolladas originalmente para otros campos.

Sin embargo, la calidad del *clustering* es crítica para profundizar en la comprensión de las propiedades de propagación para un escenario dado con el objetivo de mejorar los modelos de canal inalámbrico existentes.

La técnica de clasificación de *clusters* más básica se logra mediante inspección visual, pero se vuelve rápidamente imposible de procesar cuando se consideran conjuntos de datos grandes como los parámetros de los canales de radio MIMO. Para esos casos, no sólo se requiere un enfoque de agrupación automática, sino que también se debe de ser capaz de abarcar datos multidimensionales para obtener la solución de clustering más apropiada. Una vez que se obtiene una solución, su nivel de calidad puede evaluarse con índices de validez de agrupación (CVI) que individualmente dan una definición de cómo los datos deben agruparse [16]. A continuación se muestran algunos de los principales algoritmos de clustering utilizados.

Algoritmo K-means

El algoritmo de clustering de K-means es un conocido y popular método de agrupamiento descendente iterativo. Está destinado a escenarios en los que todas las variables son del tipo cuantitativo. Este algoritmo debe inicializarse con el número de clusters K presentes en el canal de radio, información que es a priori desconocida. K puede ser fijado inicialmente, ya sea por el usuario (mejor conjetura visual) o automáticamente con el índice de Kim-Park. Entonces, una posición inicial para los centroides K se estima típicamente seleccionando K MPCs aleatoriamente del conjunto de datos. Un enfoque determinista utilizando una métrica MCD ponderada fue también desarrollado para estimar conjuntamente el número de clusters y las posiciones de centroide, lo que reduce la complejidad general del algoritmo.

En la figura 11 se muestran los pasos de un algoritmo K-means típico como el que se ha mencionado anteriormente.

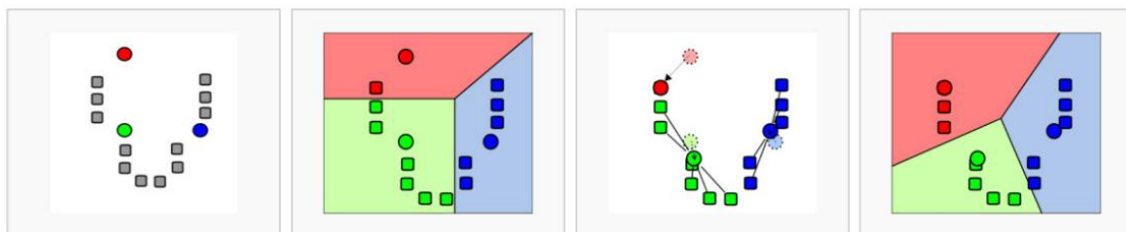


Figura 11. Pasos del algoritmo K-means [17].

En cualquier caso, se observó que el algoritmo K-means resultaba ser muy sensible a la posición inicial de los centroides y también lo era para los valores atípicos y el ruido, lo que resulta en problemas de no convergencia y una baja capacidad para pasar el óptimo local. En consecuencia, el algoritmo debe ser aplicado a los mismos datos con diferentes posiciones de centroide inicial para obtener estadísticamente la mejor solución de clustering.

Por último, el algoritmo K-means no funciona bien con clusters que tengan forma no circular y con clusters que no tienen centros bien definidos. Este último punto se atribuye al tipo de datos y a una distancia métrica inadecuada. Esto se resuelve parcialmente mediante la sustitución de la norma euclidiana al cuadrado con la componente de distancia multicamino (MCD) en el cuerpo principal del algoritmo MCD K-means. Una versión más potente del algoritmo K-means MCD, a la que se llamó KPM, se usaría más tarde para evaluar los conjuntos de datos realistas [18].

A continuación se procede a explicar el funcionamiento del algoritmo K-means MCD con más detalle.

En primer lugar, se seleccionan los MPC que más contribuyen al canal de radio (es decir, los que más potencia aportan) de todo el conjunto de datos aplicando un umbral de potencia. Para un número dado de clusters K_{init} , los centroides c_k se generan aleatoriamente a partir de los datos y se calcula el MCD entre los MPC y los centroides. También se ha propuesto un enfoque determinista para inicializar el algoritmo de agrupación utilizando una métrica MCD ponderada por potencia. Ofrece la ventaja de reducir la complejidad del algoritmo de agrupación y se ha informado que produce resultados satisfactorios. Un ejemplo de algoritmo de K-means para el cálculo de clusters podría ser el que se muestra a continuación en la figura 12.

- 1: Define K_{init} and MPCs threshold power P_T
- 2: Randomly generate c_k^i
- 3: Select MPCs with power $> P_T$
- 4: **while** $c_k^{i+1} \neq c_k^i$ **do**
- 5: Compute $MCD(l_k^i, c_k^i)$
- 6: Assign MPCs l_k^i to nearest centroid c_k^i
- 7: Update centroid position c_k^i
- 8: $i = i + 1$
- 9: **end while**

Figura 12. Ejemplo de algoritmo K-means MCD para clustering [19].

El algoritmo asigna los MPCs a los centróides más cercanos y actualiza todas las posiciones de centroides. Las posiciones de centroide se calculan como la posición media de los MPC para cada dimensión. Se ha de tener en cuenta que la potencia no se

ha incluido para ponderar el promedio. El algoritmo se detiene una vez que todos los centroides son estables.

Algoritmo Multipath Component Distance (MCD).

Otro posible enfoque es agrupar los MPC con el algoritmo MCD para los datos de onda milimétrica obtenidos en escenarios de interior, como es el del presente proyecto. En primer lugar, este método consiste en ordenar los rayos ya sea por retraso o potencia. En segundo lugar, el MCD es computarizado y se utiliza un umbral preestablecido para agrupar los rayos. En otras palabras, los rayos con MCD menor que el umbral forman un nuevo grupo. Se repiten los pasos hasta que todos los rayos se agrupan. En contraste con K-means, una característica atractiva es el hecho de que el número de clusters es la salida resultante. Por lo tanto, no es necesario el pre-procesamiento de los datos para elegir un número inicial de grupos como con K-means.

Sin embargo, ambos estudios no investigaron qué umbral MCD sería mejor a pesar de que la inspección visual de los datos fue realizada para vincular físicamente la distribución de los MPCs con el umbral establecido. El algoritmo MCD sufre dos inconvenientes principales:

- La posición del centroide nunca se actualiza.
- Algunos MPC asignados podrían estar más cerca de los nuevos clusters y deberían ser reasignados. Más tarde se modificó el algoritmo teniendo en cuenta el segundo problema.

Sin embargo, las técnicas de agrupación basadas en MCD son algoritmos muy prometedores y computacionalmente eficaces en comparación con el algoritmo K-means MCD, pero los trabajos completos sobre este tema todavía son escasos en la literatura.

A continuación se procede a explicar el funcionamiento del algoritmo MCD con más detalle.

El MCD fue introducido originalmente en [20] como una métrica para agrupar los datos del mundo real que a menudo presentan diferentes unidades y órdenes de magnitud. También resuelve el problema de ambigüedad angular. Por ejemplo, los parámetros a gran escala de los componentes multicamino MPC estimados a partir de los canales de radio MIMO medidos tales como el time of arrival (TOA), el angle of arrival (AOA) o el angle of departure (AOD) difieren mucho por naturaleza.

Esta métrica demostró ser particularmente eficaz en comparación con la métrica Euclidiana. El MCD angular entre un par de MPCs con índice (i; j) está dado por la expresión en (8).

$$MCD_{AOA/AOD,ij} = \frac{1}{2} \left| \begin{pmatrix} \text{sen}(\theta_i) \cos(\varphi_i) \\ \text{sen}(\theta_i) \text{sen}(\varphi_i) \\ \cos(\theta_i) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \text{sen}(\theta_j) \cos(\varphi_j) \\ \text{sen}(\theta_j) \text{sen}(\varphi_j) \\ \cos(\theta_j) \end{pmatrix} \right| \quad (8)$$

Donde las variables θ y ϕ son el ángulo de co-elevación y el ángulo de azimut, respectivamente.

Para la dimensión del tiempo de retardo, la métrica MCD está dada por la expresión mostrada en (9).

$$MCD_{\tau,ij} = \zeta \cdot \frac{|\tau_i - \tau_j|}{\Delta\tau_{max}} \cdot \frac{\tau_{std}}{\Delta\tau_{max}} \quad (9)$$

Donde a su vez se cumple la relación en (10).

$$\Delta\tau_{max} = \max_{i,j} \{|\tau_i - \tau_j|\} \quad (10)$$

La variable ζ es un factor de escala que proporciona flexibilidad adicional para tratar datos del mundo real. Por último, la distancia MCD completa está dada por la expresión en (11).

$$MCD(i, j) = \sqrt{\|MCD_{AOA,ij}\|^2 + \|MCD_{AOD,ij}\|^2 + \|MCD_{\tau,ij}\|^2} \quad (11)$$

El MCD angular se normaliza en el intervalo de [0, 1], mientras que MCD_{τ} está en el rango de [0, ζ]. El MCD se observó como un enfoque significativo para calcular la distancia entre MPCs [21].

3. Escenario de estudio y medidas realizadas.

En esta parte del proyecto se empezará tratando sobre el recinto que se ha elegido para realizar las medidas, así como aspectos de interés del mismo. También se verá como se ha procedido para la realización de las medidas reales.

3.1 Escenario de estudio.

El lugar que se ha elegido para estudiar el comportamiento de un canal MIMO mediante una campaña de medidas ha sido una de los laboratorios del Edificio de Investigación ELDI, en la Universidad Politécnica de Cartagena. Al tratarse de un entorno cerrado, los efectos que se producirán sobre la señal dependerán más de la distribución de la sala que de los equipos utilizados. Dicha habitación contiene escritorios, mesas, armarios y demás mobiliario que en función del material con el que están hechos, su geometría y la posición de los mismos dentro del laboratorio afectarán a la propagación de los rayos de una manera u otra. Las paredes y techos, fabricados con yeso y hormigón, así como los elementos incrustados en los mismos son elementos que también influirán.



Figura 13. Imagen real del escenario de estudio.

Para el caso del material de los elementos de la habitación, estos afectarán a la propagación en función de si están hechos de un material conductor de la electricidad o no, así como sus propiedades dieléctricas. Por ejemplo, si es un material conductor (un metal) no existe onda refractada, ya que no se propaga ninguna onda por el interior del conductor.

Respecto a la forma de los mismos, aquellos elementos que contengan aristas tenderán a hacer que los rayos que incidan en alguno de sus vértices se difracten en múltiples direcciones.

En la figura 14 se presenta un esquema del laboratorio en el que se han incluido los elementos más importantes presentes en el mismo.

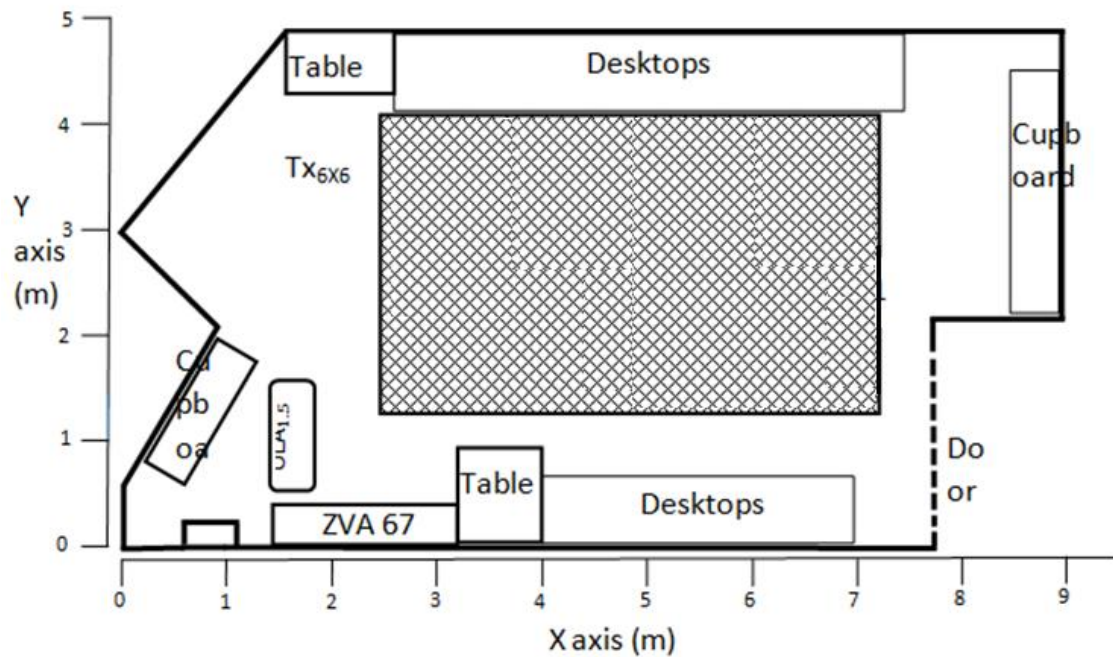


Figura 14. Plano de la habitación donde se realizará el estudio.

Una vez ha quedado claro cuál va a ser el entorno de medición, se procede a colocar en el interior del mismo las posiciones donde se realizarán las mediciones. En la figura 15 se muestra el sistema de referencia utilizado. Las variables A, B y C hacen referencia a la distancia a la que se encuentra el punto de las paredes del laboratorio en metros, lo que nos permitirá situarlo con precisión. La variable D, en cambio, hace referencia a la distancia directa desde cada posición a la posición del receptor.

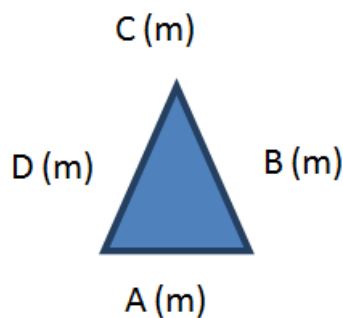


Figura 15. Sistema de referencia para medida de las distancias.

Un aspecto importante a tener en cuenta es que las posiciones de medida no serán las mismas para 94 GHz que para 60 GHz, sino que variarán. Además, mientras que para el caso de 94 GHz se analizarán 15 posiciones, para el caso de 60 GHz se analizarán 17 posiciones.

En la figura 16 se muestra el esquema de las posiciones del transmisor para el caso de 94 GHz marcadas del número 1 al 15, así como la única posición del receptor, marcada con el acrónimo ULA. Las posiciones del transmisor estaban separadas 1 m tanto en el eje X como en el eje Y, a excepción de las posiciones 5, 8 y 9, cuya separación entre ellas en la dirección X fue de 0,5 m. Respecto a las alturas, la antena transmisora se colocó a una altura de 0,886 m, mientras que la antena receptora se colocó a 0,784 m respecto del suelo.

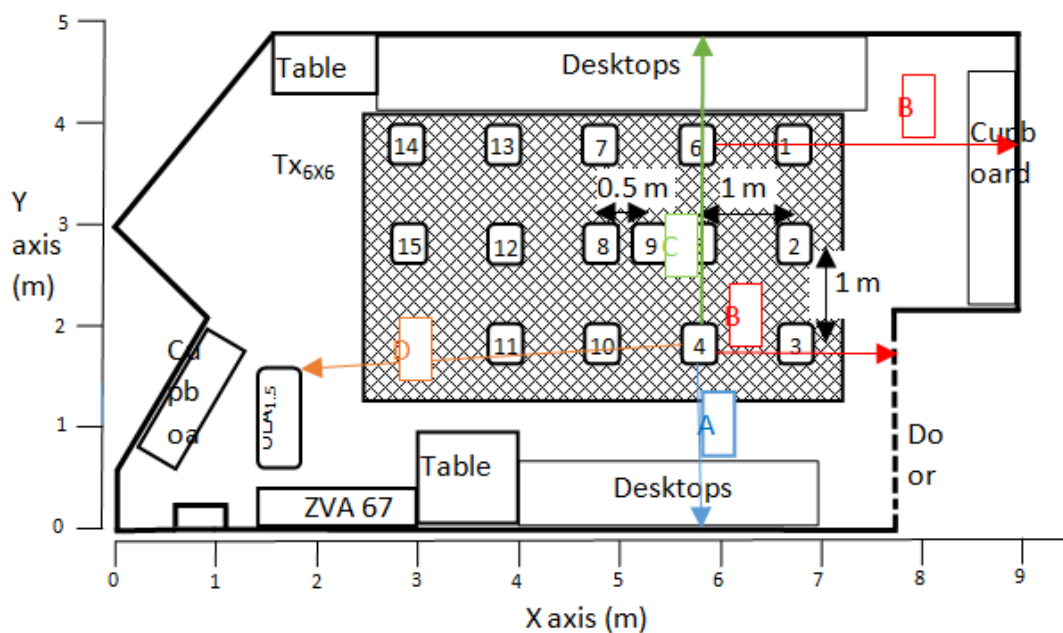


Figura 16. Situación de los puntos dentro de la habitación para 94 GHz.

A modo de resumen, se incluye una tabla en la que se recopilan todas las distancias de cada una de las posiciones respecto a cada una de las paredes de la habitación. También se incluyen las alturas de la antena transmisora URA y la antena receptora URA.

Número posición	A (m)	B (m)	C (m)	D (m)
1	3,835	1,423	1,009	5,491
2	2,831	1,431	2,015	5,147
3	1,828	1,077	3,026	4,923
4	1,798	2,056	3,008	3,923
5	2,797	2,809	2,024	4,095
6	3,787	2,835	1,059	4,386
7	3,794	3,825	1,030	3,682
8	2,742	3,828	2,092	3,143
9	2,765	3,325	2,059	3,586
10	1,796	3,088	3,015	2,895
11	1,874	4,045	2,947	1,955
12	2,788	4,814	2,037	2,258
13	3,784	4,856	1,028	2,871
14	3,772	5,874	1,036	2,330
15	2,805	5,856	2,012	1,468
Rx ULA				
	1,620	5,985	3,22	
Alturas				
Rx ULA	0,784			
Tx URA	0,886			

Tabla 1. Distancias para cada punto dentro de la habitación a 94 GHz.

Para el caso del 60 GHz la distribución de las posiciones de medida dentro de la sala fue la que se muestra a continuación en la figura 17. De nuevo se vuelve a utilizar el sistema de referencia mencionado anteriormente.

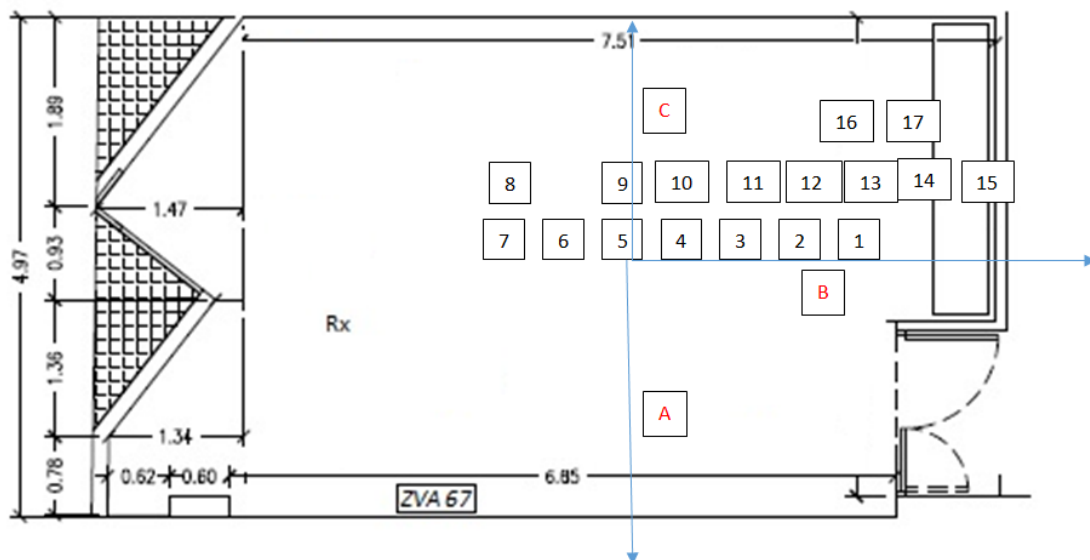


Figura 17. Situación de los puntos dentro de la habitación para 60 GHz.

De nuevo se incluye una tabla en la que se recopilan todas las distancias de cada una de las posiciones, así como de la antena receptora.

Número posición	A (m)	B(m)	C(m)	D (m)
1	2,171	1,448	2,571	4,609
2	2,231	1,870	2,635	4,234
3	2,059	2,232	2,566	3,873
4	2,178	2,619	2,596	3,488
5	2,221	3,018	2,571	3,112
6	2,210	3,429	2,593	2,856
7	2,235	3,929	2,176	2,940
8	2,653	3,932	2,095	2,789
9	2,562	3,071	2,240	3,558
10	2,569	2,678	2,241	3,877
11	2,558	2,252	2,193	3,956
12	2,593	1,832	2,282	4,056
13	2,613	1,463	2,178	4,236
14	2,609	1,092	2,193	4,539
15	2,611	0,631	2,197	4,766
16	3,105	1,739	1,72	4,487
17	3,115	1,345	1,692	4,767
ULA 1 posición	1,084	6,040	3,734	

Tabla 2. Distancias para cada punto dentro de la habitación a 60 GHz.

Una vez se conocen los parámetros más relevantes del escenario de estudio así como los puntos de medición, el siguiente paso será proceder con la campaña de medidas para 60 GHz y 94 GHz.

3.2 Medidas realizadas.

En el presente apartado se explica brevemente cómo se han obtenido las medidas a partir de las cuales fueron posibles las simulaciones que se realizarán más adelante. La explicación de las mismas será breve debido a que su obtención no forma parte del presente proyecto, pero sí es importante comprender cómo se tomaron para poder realizar correctamente las simulaciones y poder así realizar un estudio exhaustivo de los parámetros obtenidos a partir de dichas medidas.

Otro aspecto a destacar es que la campaña de medidas se ha realizado para dos bandas de frecuencias. Como ya se ha comentado en el apartado anterior, una a 60 GHz y otra a 94 GHz.

Medidas a 94 GHz.

Para obtener la función de transferencia del canal en el dominio de la frecuencia $H(f)$ la cual relaciona el espectro de la señal de la salida con el espectro de la señal de entrada, se utilizó un analizador vectorial de redes ZVA 67. El sistema fue calibrado con el retardo. El rango de frecuencias en el que se midió fue de 92,5-95,5 GHz, utilizando un total de 1024 puntos de frecuencia.



Figura 18. Analizador de redes usado para realizar las medidas [22].

Como ya se comentó en el apartado anterior, la altura del receptor es de 0,784 m y la del transmisor es de 0,886 m. Tanto para transmisor como receptor usaban dos antenas omnidireccionales polarimétricas idénticas (WR-10) con una ganancia de 2 dB y una abertura de 30°. En cada posición, las antenas de transmisión se mueven usando un Array Rectangular Uniforme (URA), mientras que en recepción se usa un Array Lineal Uniforme (ULA). Para la ULA, los cinco elementos que formaban la antena receptora estaban espaciados equitativamente, separados 1mm ($0,4\lambda$ a 94 GHz) mientras que para la URA las mediciones se realizaron sobre una cuadrícula rectangular uniforme de 6x6 con un espaciamiento de 1 mm a lo largo de X e Y.

Se realizaron distintas mediciones con dos combinaciones de las polarizaciones del transmisor y receptor obteniendo Tx horizontal y Rx horizontal (HH) o Tx vertical y Rx

vertical (VV). Este tipo de polarización se denomina copolar, mediante la cual se maximiza la cantidad señal que llega al receptor. También se realizaron combinaciones de ambas.

Cabe destacar que muchas medidas se han obtenido para las cuatro posibles combinaciones (Vertical - Vertical, Horizontal - Vertical, Vertical - Horizontal, Horizontal-Horizontal), pero solo se va a trabajar con las medidas que tienen polarización Vertical - Vertical (VV) y con las que tienen polarización Horizontal – Horizontal (HH) dado que el estudio de las otras dos restantes combinaciones no proporcionan datos relevantes, además del motivo de maximización de la señal.

Frecuencia	94 GHz
Ancho de banda	3 GHz
Frecuencia inferior	92,5 GHz
Frecuencia superior	95,5 GHz
Frecuencia intermedia	10 Hz
Número de puntos	1024

Tabla 3. Parámetros de las medidas a 94 GHz.

Medidas a 60 GHz.

Al igual que para 94 GHz, se ha utilizado una sonda de canal basado en el analizador de redes ZVA67. El rango de frecuencias medido fue de 57- 66 GHz, con 2048 puntos de frecuencia. Se utilizan dos amplificadores en la transmisión para compensar la atenuación de los cables (HXI HLNA-465) además de calibrar el sistema para eliminar el efecto de los cables y los amplificadores. Tanto las antenas de transmisión como las de recepción son omnidireccionales (Q-par QOM55-65 VRA) con ganancia de 4,5 dBi, siendo su polarización siempre vertical.

Por otro lado, la altura de la antena transmisora fue de 1,42 m mientras que la de la receptora fue de 1,55m. Al igual que antes, la antena receptora está formada por 5 elementos, pero en este caso separados por 2 mm, mientras que la antena transmisora se mueve utilizando una matriz rectangular uniforme de 6x6 con un espaciado de 2 mm en ambas dimensiones.

Frecuencia	60 GHz
Ancho de banda	9 GHz
Frecuencia inferior	57 GHz
Frecuencia superior	66 GHz
Frecuencia intermedia	10 Hz
Número de puntos	2048

Tabla 4. Parámetros de las medidas a 60 GHz.

Una vez se han obtenido las medidas se procederá a su análisis mediante el cual se obtendrán los parámetros que permiten caracterizar el canal de propagación estudiado.

4. Metodología de análisis.

En el presente apartado se va a explicar paso a paso el proceso que se ha llevado a cabo para obtener los parámetros que permiten caracterizar el canal a partir de las medidas realizadas. Una vez realizado este apartado se procederá a realizar las simulaciones y a la obtención de los parámetros de interés de las mismas.

Para el caso de las simulaciones se partirá de la configuración de los parámetros de entrada al trazador de rayos, seguiremos con las modificaciones que se realizaron para ajustar la simulación a las medidas obtenidas experimentalmente y finalmente se obtendrán las simulaciones de una forma secuencial, es decir, primero se obtendrán las simulaciones teniendo en cuenta únicamente una reflexión hasta llegar a simulaciones más completas, que contemplan varias reflexiones, parámetros como reflexión y difracción o fenómenos de escater, también conocido como scattering difuso.

Durante todo este proceso han ido apareciendo algunos errores que han tenido que ser corregidos y que también se mostrarán aquí con el fin de entender el proceso de simulación completo.

4.1 Análisis de las medidas.

Mediante el análisis de las medidas se podrán obtener los parámetros que permiten caracterizar el canal radioeléctrico. Estos parámetros permiten comprender los resultados obtenidos con las medidas, así como diseñar el sistema para asegurar una comunicación satisfactoria. A continuación se van a desarrollar cada uno de estos parámetros con más detenimiento.

Perfil de retardo normalizado o *Power delay profile*.

El primero de estos parámetros es el denominado power delay profile (PDP) o perfil de retardo normalizado, que es la representación de la potencia recibida en el receptor en función del retardo. Se trata de la media de los módulos al cuadrado de diversas respuestas impulsionales cronovariantes tomadas en diferentes puntos cercanos. Dicho PDP se obtiene a partir de la función de transferencia $h(\tau)$, el cual a su vez se obtiene como la transformada de Fourier inversa de $H(f)$, que es la respuesta en frecuencia del canal (12).

$$h(\tau) = TF^{-1}[H(f)] \quad (12)$$

Esto se puede hacer porque el canal es estático y no hay elementos en movimiento, de no ser así la función de transferencia dependería también del tiempo. Una vez se tiene $h(\tau)$ se calcula el PDP (13) como el cuadrado del módulo de la función de transferencia. Esta respuesta es obtenida mediante una medida en banda ancha en la que se emplea un analizador de redes.

$$P(\tau) = |h(\tau)|^2 = |\text{TF}^{-1}(H(f))|^2 \quad (13)$$

Debido a que el canal es aleatorio, para realizar una medida certera del PDP se deben llevar a cabo varias medidas instantáneas del PDP en un área local. El perfil de retardo normalizado final se halla promediando las mencionadas medidas. Además, se debe evitar que el muestreo de cada medida instantánea corresponda a una medida de gran escala. Para ello, dependiendo de la resolución del método empleado en la medida del PDP y del tipo de canal estudiado, se suelen elegir muestras separadas $\lambda/4$ o sobre movimientos del receptor no superiores a los seis metros en canales en espacios abiertos y no superiores a los dos metros en entornos en el interior de edificios.

Se suele utilizar un enventanado (en frecuencia) para reducir la amplitud de los lóbulos secundarios (en el tiempo). Así, se obtiene una respuesta más suave, sin la distorsión de los lóbulos. Para hacer esta operación se multiplica la respuesta en frecuencia por una ventana de la misma longitud que las muestras (14).

$$PDP(\tau) = |\text{TF}^{-1}(H(f) \cdot \text{Ventana}(f))|^2 \quad (14)$$

A partir del power delay profile se pueden sacar los demás parámetros que permiten caracterizar el canal de transmisión, y que se mostrarán a continuación.

Relative received power.

El parámetro relative received power (Pr), también llamado potencia relativa recibida, es la suma de las potencias recibidas en cada instante tras pasar por un enlace. Va medido en dB y se calcula de la manera mostrada en (15).

$$Pr = 10\log_{10}\left(\sum_{i=1}^N PDP_{lineal}(\tau_i)\right) \quad (15)$$

RMS Delay Spread.

El Root Mean Square Delay Spread (DS) o valor cuadrático medio del retraso de propagación es un parámetro que mide la dispersión temporal de la potencia recibida en el receptor. Va medido en segundos y se calcula mediante la expresión en (16).

$$\tau_{rms} (S) = \sqrt{\frac{\sum_i p'(\tau_i) \tau_i^2}{\sum_i p'(\tau_i)} - \left(\frac{\sum_i p'(\tau_i) \tau_i}{\sum_i p'(\tau_i)} \right)^2} \quad (16)$$

Donde p' es cada uno de los valores del PDP que superan un umbral determinado y τ es el tiempo que se asocia a dicho valor.

Este parámetro da una idea del ensanchamiento del retardo en torno al exceso de retardo medio, es decir, de la cantidad y potencia de las réplicas multicamino. Puede darse el caso de que dos PDP tengan un exceso de retardo medio similar y sin embargo valores de ensanchamiento muy diferentes. Aquel que tenga más réplicas multicamino o bien un número similar de réplicas pero dotadas todas ellas con una potencia parecida poseerá el mayor valor cuadrático medio de ensanchamiento. Cuantas más réplicas existan y más potencia posean, mayor será el valor del parámetro de ensanchamiento.

Otro aspecto a tener en cuenta del RMS delay spread es que es importante eliminar el ruido de las medidas. Para ello, a partir del PDP, sólo nos quedamos con las contribuciones que tengan una potencia mínima, por lo que se hará uso de un umbral. La potencia mínima se calcula como el valor de potencia máximo del PDP menos el valor del umbral seleccionado. Todas aquellas contribuciones del PDP que queden por debajo del valor de potencia mínima serán descartadas para el cálculo del RMS.

Maximum excess delay.

El parámetro temporal denominado Maximum excess delay (MED) o exceso de retardo máximo se define como el máximo retardo en el que la potencia cae hasta una cierta cantidad de dB por debajo del máximo de potencia en el PDP. Se mide en segundos y se calcula mediante la expresión en (17).

$$MED = \max(\tau_i) - \min(\tau_i) \quad (17)$$

Entre el retardo inicial y el exceso de retardo máximo existirán réplicas que caerán por debajo del límite tomado. El exceso de retardo máximo es el último retardo en el que la potencia está por encima del límite mencionado. Por tanto, este parámetro indica el periodo temporal en el que la señal está por encima de un umbral determinado de potencia.

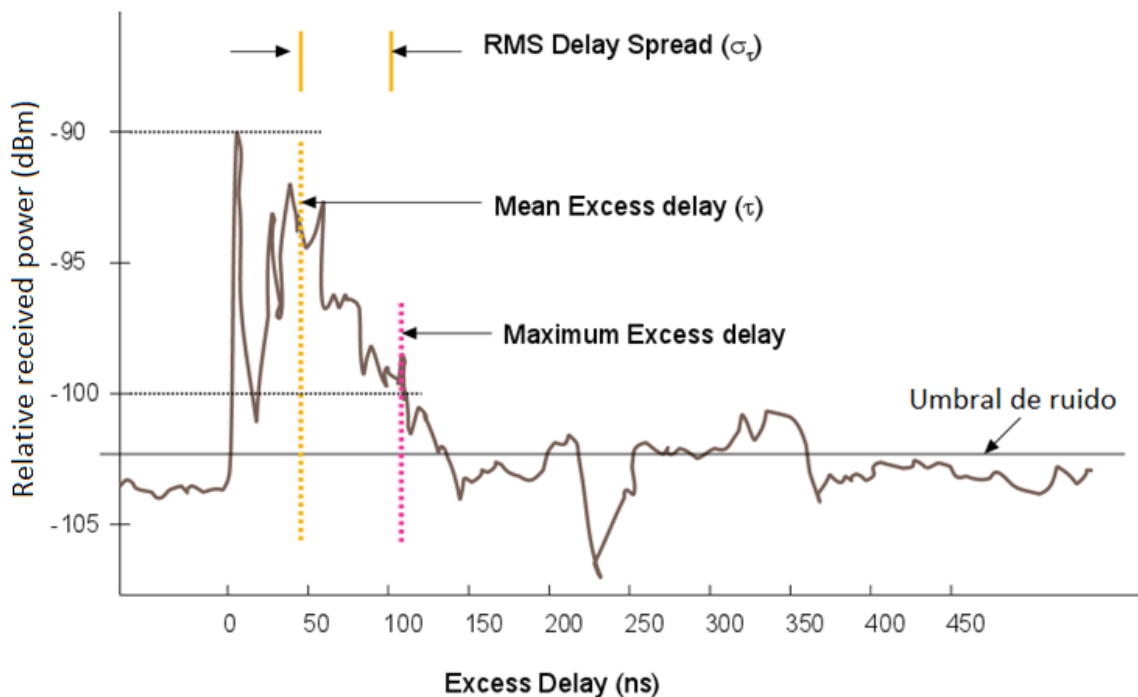
Pérdidas.

Este parámetro es similar a la potencia relativa recibida, pero se calcula como la inversa del mismo (18). También se mide en dB.

$$Pérdidas = -10\log_{10}\left(\sum_{i=1}^N PDP_{lineal}(\tau_i)\right) \quad (18)$$

Dichas pérdidas constituyen la atenuación que sufre la señal, siendo directamente proporcionales entre la distancia entre transmisor y receptor y directamente con la frecuencia, lo que implica que son inversamente proporcionales a la longitud de onda. De esto se deduce que los resultados obtenidos con este parámetro serán inversos a los de la potencia.

En la gráfica 3 podemos ver una representación de todos los parámetros anteriormente analizados y cómo se relacionan entre ellos a partir de 0 nanosegundos.



Gráfica 3. Representación gráfica de los parámetros del canal.

4.2 Simulaciones con el trazador de rayos.

En este apartado se va a proceder a obtener los parámetros del canal de propagación mediante un simulador desarrollado en Matlab al cual se le va a llamar trazador de rayos. Esta herramienta supone que la propagación de los rayos sigue las reglas de la óptica física. El campo en el receptor será la suma de todos los rayos que lo interceptan. Otro aspecto interesante del trazador de rayos es que es capaz de realizar simulaciones teniendo en cuenta diferentes mecanismos de propagación. Se parte de un caso inicial muy sencillo y poco realista, y se le van añadiendo cada vez más mecanismos que dan lugar a casos más complejos y realistas.

Mecanismos de propagación

Como se ha comentado anteriormente, el trazador de rayos realiza las simulaciones del entorno de propagación basándose en diferentes mecanismos de propagación. Los principales son los que se muestran a continuación.

Reflexiones de primer orden.

Las reflexiones se producen cuando la onda electromagnética incide sobre un objeto que tiene dimensiones muy grandes en comparación con la longitud de onda de dicha onda electromagnética. Para que exista reflexión el objeto contra el que choca la onda electromagnética debe tener propiedades electromagnéticas diferentes respecto al medio por el que se propaga la onda incidente.

Si se consideran sólo las de primer orden, serán aquellas que, tras incidir en un elemento, llegan al receptor sin incidir en ningún otro. También son consideradas de primer orden aquellas que puedan atravesar un elemento que produce una atenuación extra en la onda. Estas reflexiones serán las que habrá que tener más en cuenta a la hora de la obtención del perfil de retardo normalizado.

Reflexiones de segundo orden.

En este caso se tienen en cuenta los rayos que inciden en dos puntos distintos antes de llegar al receptor. El procedimiento es el mismo que las reflexiones de primer orden, con la diferencia de que se aplica dos veces.

Difracción.

La difracción es un mecanismo de propagación que permite a las ondas electromagnéticas llegar hasta el receptor cuando no existe visión directa o no aparecen contribuciones debidas a la reflexión. Este efecto surge cuando la onda electromagnética incide sobre un obstáculo que presenta irregularidades afiladas o puntiagudas. Este mecanismo se explica gracias al principio de Huygens, que indica que todos los puntos de un frente de ondas se pueden considerar fuentes de producción de ondas secundarias.

Reflexiones de primer orden y difracción.

Este mecanismo no es más que la combinación de un primer rayo que sufre una reflexión en un objeto y posteriormente se difracta en un obstáculo con forma puntiaguda difractándose hasta llegar al receptor.

Difusión.

El 'scattering' o difusión se produce cuando la onda electromagnética choca sobre objetos cuyo tamaño es pequeño comparado con la longitud de onda o cuando el número de obstáculos por unidad de volumen es alto (obstáculos rugosos). En este caso la energía reflejada se difunde en todas las direcciones del espacio.

Obtención de los parámetros.

Lo primero de todo será configurar el trazador para que proporcione los datos de interés. Para ello hay que introducir una serie de parámetros en determinadas funciones del trazador.

La primera función es 'simulacion_completa_nueva'. En dicha función se especifica el nivel de realismo que se le quiere proporcionar a la simulación, en concreto el número de reflexiones que sufrirán los rayos, si existirán rayos que sufran difracción o reflexión más difracción al mismo tiempo y cuantas veces lo harán. También se especifica la polarización de las antenas del transmisor y el receptor, la posición de estudio y de si se trata de un caso a 94 o 60 GHz.

```

%Parámetros de simulación
num_reflex=2;
difr=1;
escater=0;
refl_difr=1;
difr_refl=1;
num_reflex_difr=1;

```

Figura 19. Ejemplo de parámetros de simulación de entrada.

Esta función también se encarga de llamar a la función 'simula_H', que es la función núcleo del trazador y que se encarga de las principales funciones del mismo.

La siguiente función se trata de la anteriormente mencionada 'simula_H', en la cual hay una variable de entrada muy importante a tener en cuenta. La variable llamada 'un_punto_una_frec' puede valer 0 o 1 en función de los parámetros que se quieran obtener. Cuando dicha variable está a 0 se consideran todos los transmisores y todos los receptores en el canal de transmisión, así como todos los puntos de medida alrededor de una posición. Esto último hace referencia a que en el presente estudio se cuenta con la respuesta frecuencial en 36 puntos posicionados en una malla rectangular uniforme de 6 x 6 para cada posición como muestra la figura 20. Los puntos adyacentes están separados $\lambda/4$ donde λ es la longitud de onda de la frecuencia central de la banda empleada.

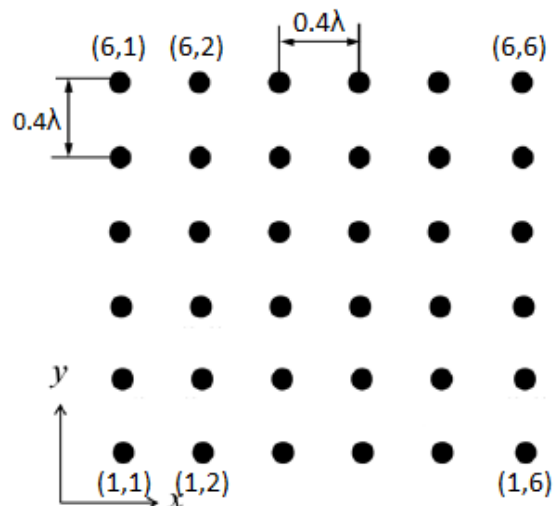


Figura 20. Distribución de la malla de puntos alrededor de la posición de medida.

Con esta configuración se obtienen el campo eléctrico, el campo magnético, el power delay profile (con y sin ventana hanning) y las pérdidas de propagación entre otros parámetros.

Import	Name ▲	Size	Bytes	Class
<input checked="" type="checkbox"/>	E_aprox_freq	1x1024	16384	double
<input checked="" type="checkbox"/>	H	4-D	2949120	double
<input checked="" type="checkbox"/>	PDP_sim	1x1024	8192	double
<input checked="" type="checkbox"/>	PDP_sim_hanning	1x1024	8192	double
<input checked="" type="checkbox"/>	PL_sim	1x1	8	double
<input checked="" type="checkbox"/>	PL_sim_hanning	1x1	8	double
<input checked="" type="checkbox"/>	RMS_sim	1x1	8	double
<input checked="" type="checkbox"/>	RMS_sim_hanning	1x1	8	double
<input checked="" type="checkbox"/>	tau	1x1024	8192	double
<input checked="" type="checkbox"/>	valor_medio_sim	1x1	8	double
<input checked="" type="checkbox"/>	valor_medio_sim_...	1x1	8	double

Figura 21. Parámetros obtenidos para 'un_punto_una_freq' igual a 0.

Para el caso de que esta variable valga 1 sólo se considera un transmisor, un receptor y un punto de medida para cada posición. Esto es útil para el cálculo de parámetros geométricos del canal de transmisión como pueden ser los ángulos de llegada al receptor y los ángulos de salida del transmisor o los tiempos de llegada. Además permite disminuir el tiempo de simulación.

Import	Name ▲	Size	Bytes	Class
<input checked="" type="checkbox"/>	DoA_azimuth	1x166	1328	double
<input checked="" type="checkbox"/>	DoA_elevation	1x166	1328	double
<input checked="" type="checkbox"/>	DoD_azimuth	1x166	1328	double
<input checked="" type="checkbox"/>	DoD_elevation	1x166	1328	double
<input checked="" type="checkbox"/>	E_total	1x166	2656	double
<input checked="" type="checkbox"/>	TOA_total	1x166	1328	double
<input checked="" type="checkbox"/>	rel_power_comp	1x166	1328	double
<input checked="" type="checkbox"/>	rx	3x1	24	double
<input checked="" type="checkbox"/>	tx	3x1	24	double

Figura 22. Parámetros obtenidos para 'un_punto_una_freq' igual a 1.

Un aspecto interesante del trazador es que aparte de poder obtener con el mismo los parámetros de caracterización del canal que se obtuvieron con las medidas es que va a permitir obtener nuevos parámetros, como pueden ser la dispersión angular y el valor medio de los ángulos.

Dispersión angular.

Este parámetro es el ángulo para el cual la densidad de potencia del haz es igual a la mitad de la densidad de potencia de pico. Se mide en grados y se obtiene mediante la fórmula en (19).

$$AS(s) = \sqrt{\frac{\sum_n |a_i|^2 \alpha_i}{\sum_n |a_i|^2} - \left(\frac{\sum_n |a_i|^2 \alpha_i}{\sum_n |a_i|^2} \right)^2} \quad (19)$$

Donde a_i es la potencia relativa recibida en lineal y α es la dirección de llegada correspondiente. Se obtiene tanto para los planos de azimuth como de elevación de las antenas.

Valor medio de los ángulos.

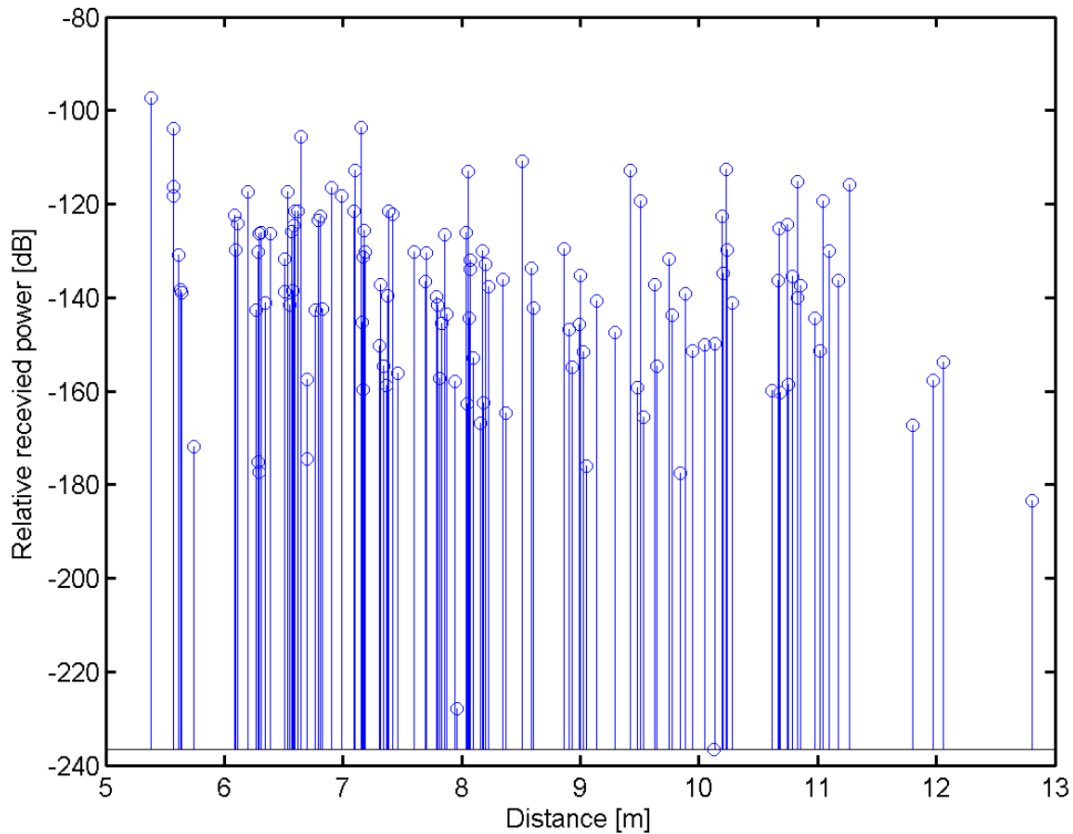
Similar al parámetro anterior, se obtiene mediante la expresión en (20).

$$VM(s) = \frac{\sum_n |a_i| \alpha_i}{\sum_n |a_i|} \quad (20)$$

Este parámetro también se obtiene para los planos de azimuth y de elevación de las antenas.

El trazador genera también una serie de gráficas que aportan datos de gran interés y que ayudan a la modelación del canal relacionando entre sí distintos parámetros del mismo. A continuación se muestran cada una de estas gráficas.

La primera de ellas es la gráfica del CIR (Channel Infinite Response), que es la función de transferencia $h(\tau)$ con un ancho de banda infinito. En las simulaciones se ha realizado para una única frecuencia y mediante él se puede relacionar la potencia relativa recibida en dB gracias a cada contribución, y la distancia en metros que han recorrido. Cada una de las contribuciones se representa como una delta de Dirac. A continuación se muestra un ejemplo en la gráfica 4.

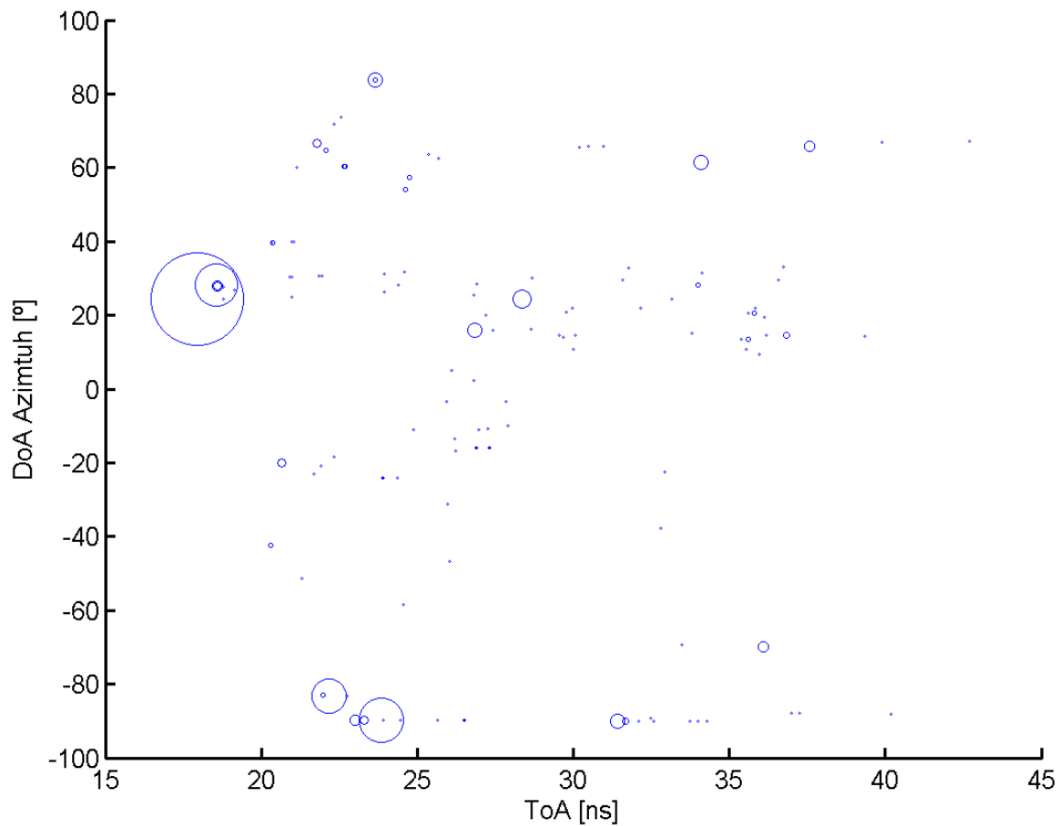


Gráfica 4. Ejemplo de gráfica de CIR.

En las gráficas que se muestran a continuación se relacionan el ángulo y el tiempo de llegada de las distintas contribuciones, tanto del rayo directo como de los rayos reflejados una o más veces y de los difractados.

La circunferencia hace referencia a la cantidad de potencia relativa recibida que aporta cada rayo. La más grande se corresponderá con la de la contribución directa, mientras que cuantas más reflexiones y difracciones sufran los rayos, menor será el tamaño de dichas circunferencias al atenuarse más.

Cabe destacar que dichas gráficas se han obtenido tanto para el plano de elevación como el de azimut, así como para el caso de salida de la antena transmisora y de llegada a la antena receptora. A continuación se muestra un ejemplo en la gráfica 5.



Gráfica 5. Potencia recibida, ángulo de llegada e instante temporal.

Aspectos a tener en cuenta del trazador.

Al inicio de este apartado se comentó que durante el proceso de realización de las simulaciones fueron surgiendo algunos imprevistos y problemas que hubo que ir solucionando y teniendo en cuenta para así poder obtener unos resultados satisfactorios.

El primer problema que surgió fue debido al ángulo de apuntamiento de las antenas en el plano de elevación, tanto en transmisión como en recepción. El modelo de antena que se utilizó en la campaña de medidas se caracterizaba por ser omnidireccional en el plano de azimut pero presentar cierta ganancia directiva para el plano de elevación. En la figura 23 se presenta el diagrama de radiación de dicha antena en coordenadas polares.

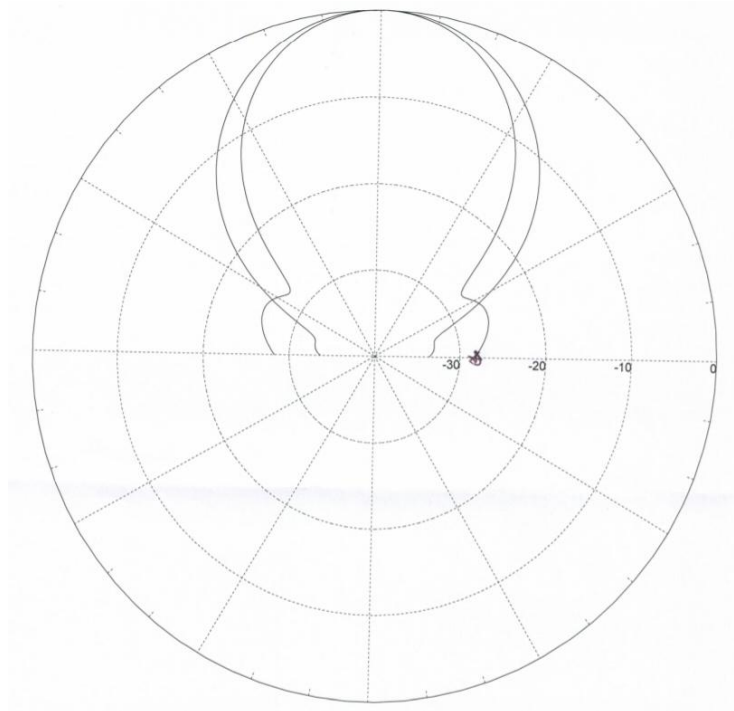
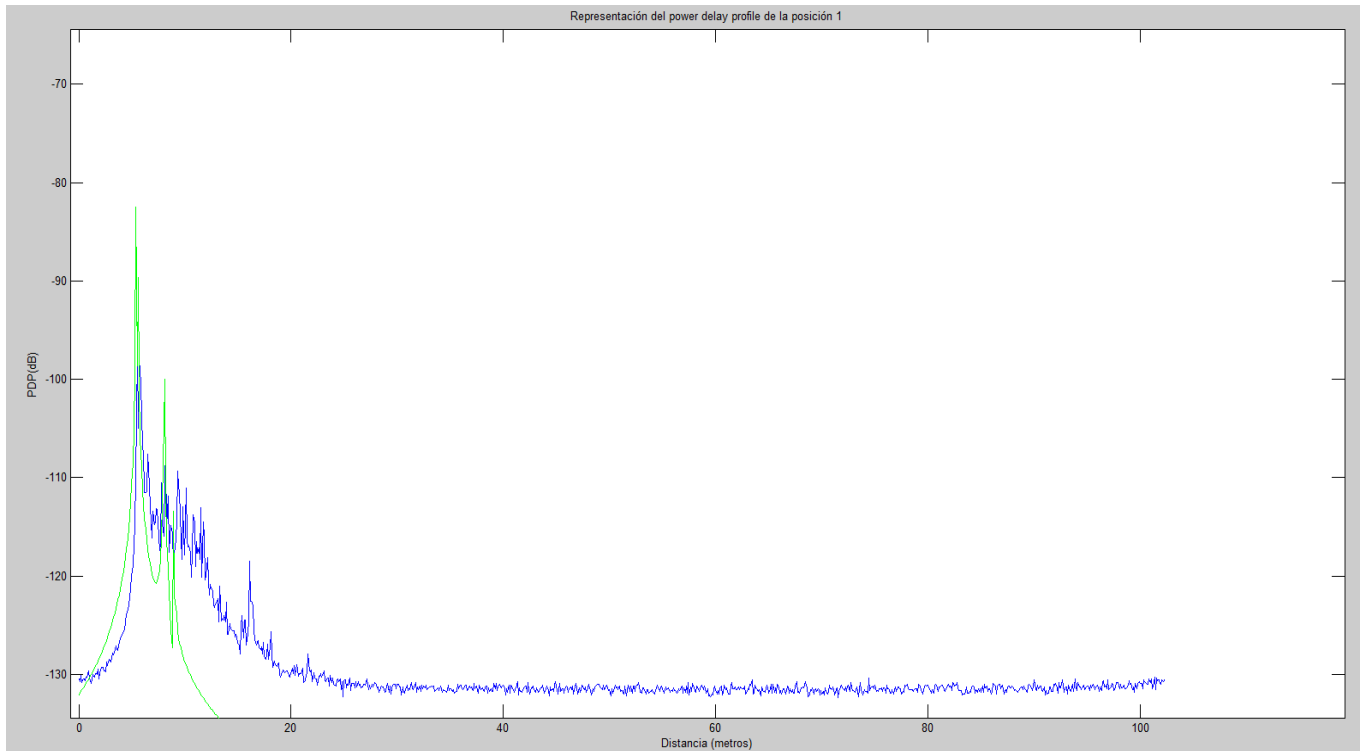


Figura 23. Diagrama de radiación en el plano de azimuth de la antena.

Resulta que durante dichas mediciones el máximo del diagrama de radiación se encuentra desviado, y en lugar de apuntar en la dirección $\theta=90$ grados (siendo θ el ángulo de elevación) apunta aproximadamente en un ángulo θ en torno a 65 grados.

Cuando se realizó la primera simulación, en concreto la de la posición 1, y se comparó el power delay profile obtenido con el que se había obtenido mediante las simulaciones se observó que la primera contribución (la más importante) de las simulaciones llegaba con mucha más potencia y con un retardo ligeramente menor que el de las simulaciones. Esto se debía a lo comentado en el párrafo anterior, y se debía de tomar alguna solución al respecto. Cabe destacar que este efecto también se produce debido a que siempre hay un cierto error al determinar las distancia A, B, C, D y debido a que la longitud eléctrica de la antena no es contabilizada en la estimación de la posición indicada en las variables A,B,C y D.

En la gráfica 6 podemos ver la representación del power delay profile de las medidas en azul y el de las simuladas en azul.



Gráfica 6. Comparación inicial del PDP de las medidas y simulaciones.

Para contrarrestar este efecto se decidió crear una nueva función a la que se llamó 'desvio_diagrama_100GHz', en la cual se aplicaba para cada posición un desvío del diagrama de radiación de las simulaciones que permitiera que las mismas fueran lo más fieles posibles a las medidas. Dicho desvío se aplicaba para cada una de las posiciones de medida, como se puede ver en la figura 24 que es un extracto de dicha función.

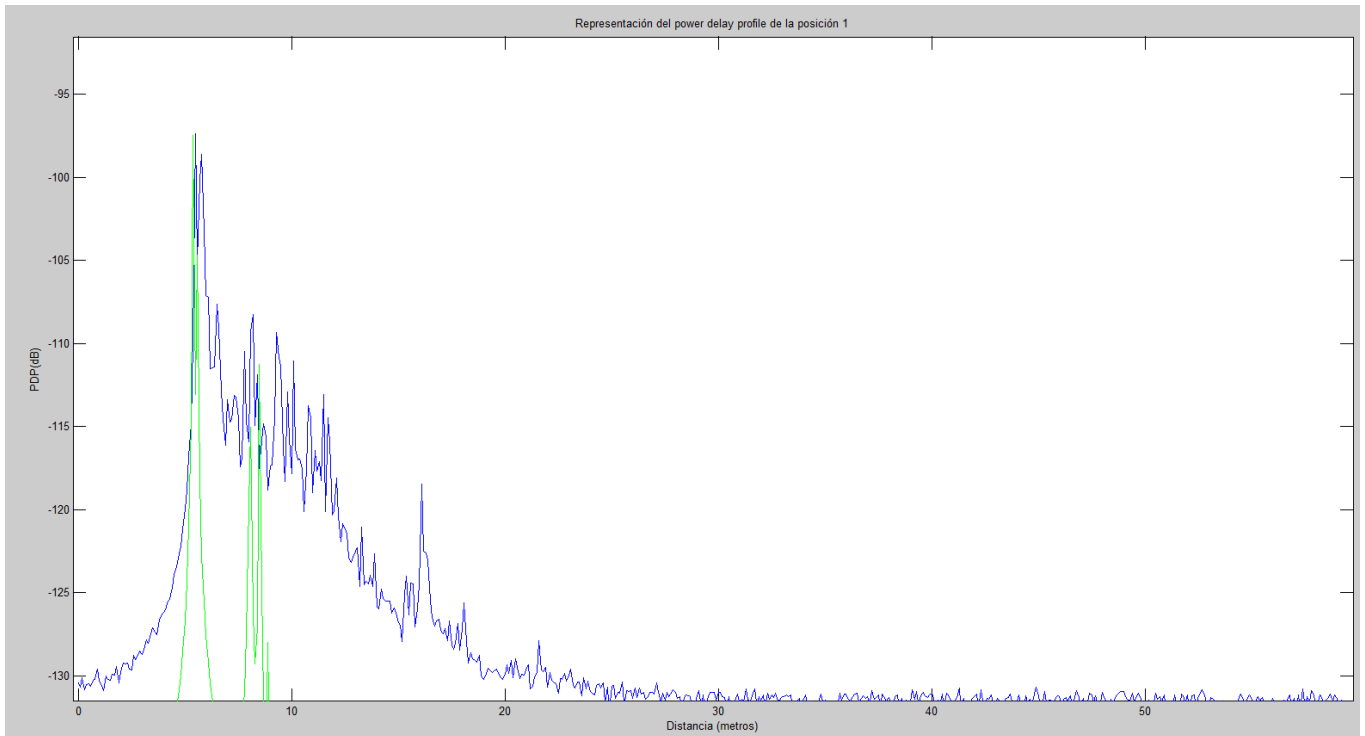
```
function desvio_grados=desvio_diagrama_100GHz(pos)

% Ajusta el diagrama de radiación de las antenas de la banda de 90 GHz a
% 100 GHz

switch pos;
case {1}
    %Para la posición 1 estos parámetros
    desvio_grados=27; %comprobado
case{2}
    %Para la posición 2 estos parámetros
    desvio_grados=24; %comprobado
case{3}
    %Para la posición 3 estos parámetros
    desvio_grados=23; %comprobado
case{4}
    %Para la posición 4 estos parámetros
    desvio_grados=23; %comprobado
```

Figura 24. Función 'desvio_diagrama_100GHz'.

Cabe destacar que se dio más importancia a la contribución directa a la hora de ajustar el desvío del diagrama de radiación, ya que es la que más energía aporta. Tras haber realizado las correcciones se volvió a realizar la simulación y los resultados obtenidos fueron los siguientes.



Gráfica 7. Comparación inicial del PDP de las medidas y simulaciones corregidas.

Como se puede observar claramente la simulación es ahora mucho más similar a la medida en términos de potencia recibida y tiempo de retardo, por lo que se puede decir que las correcciones realizadas han sido satisfactorias. El desvío que se aplicó para cada una de las posiciones oscila alrededor de 27 grados.

Otro aspecto que se tuvo que tener en cuenta es cómo se tomaban los ángulos de salida del transmisor y de llegada al receptor que se usan por ejemplo para el cálculo de la dispersión angular y el valor medio de los ángulos.

Mientras que en el array receptor el ángulo de llegada solo puede tener un valor comprendido entre ± 90 grados, en el array transmisor el ángulo de salida puede adoptar cualquier valor entre ± 180 grados. En la figura 25 se muestra lo que se acaba de estipular.

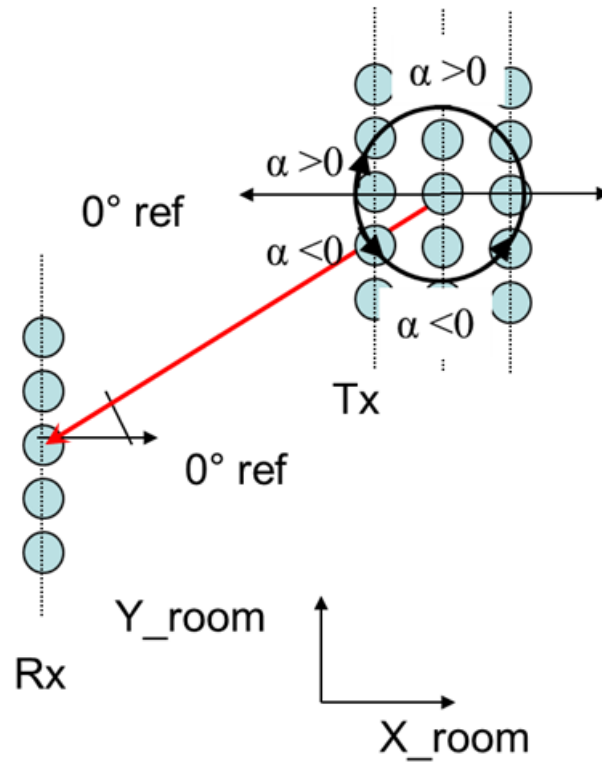


Figura 25. Sistema de referencia para la toma de los ángulos.

Como se puede observar, se hace uso de dos vectores de referencia en 0 grados, cada uno con un sentido contrario. Por lo tanto, dependiendo del ángulo con el que llegue un rayo al receptor, se hará uso de un vector de referencia u otro para que éste nunca supere un valor de ± 90 grados.

5. Resultados obtenidos.

En este apartado se mostrarán los resultados obtenidos para este caso de entorno de propagación en interiores por ondas milimétricas.

Se verán los parámetros que permiten caracterizar el canal en las bandas de 94 GHz y 60 GHz para los casos de polarización copolar vertical VV y horizontal HH tanto para las medidas como para las simulaciones, y una vez hecho esto también se compararán ambos entornos de medida y simulación con el fin de validar las simulaciones que se han realizado. Esto permitirá asegurar la precisión y rendimiento del trazador de rayos.

5.1 Resultados para la banda de 94 GHz.

Como se estableció en el primer apartado de la metodología de análisis, los primeros parámetros que se han obtenido son la potencia relativa recibida, el RMS delay spread, el maximum excess delay y las pérdidas, todos ellos correspondientes a las medidas realizadas. En la tabla 5 se recopilan todos estos parámetros tanto para polarización copolar vertical como horizontal con un umbral de 20 dB.

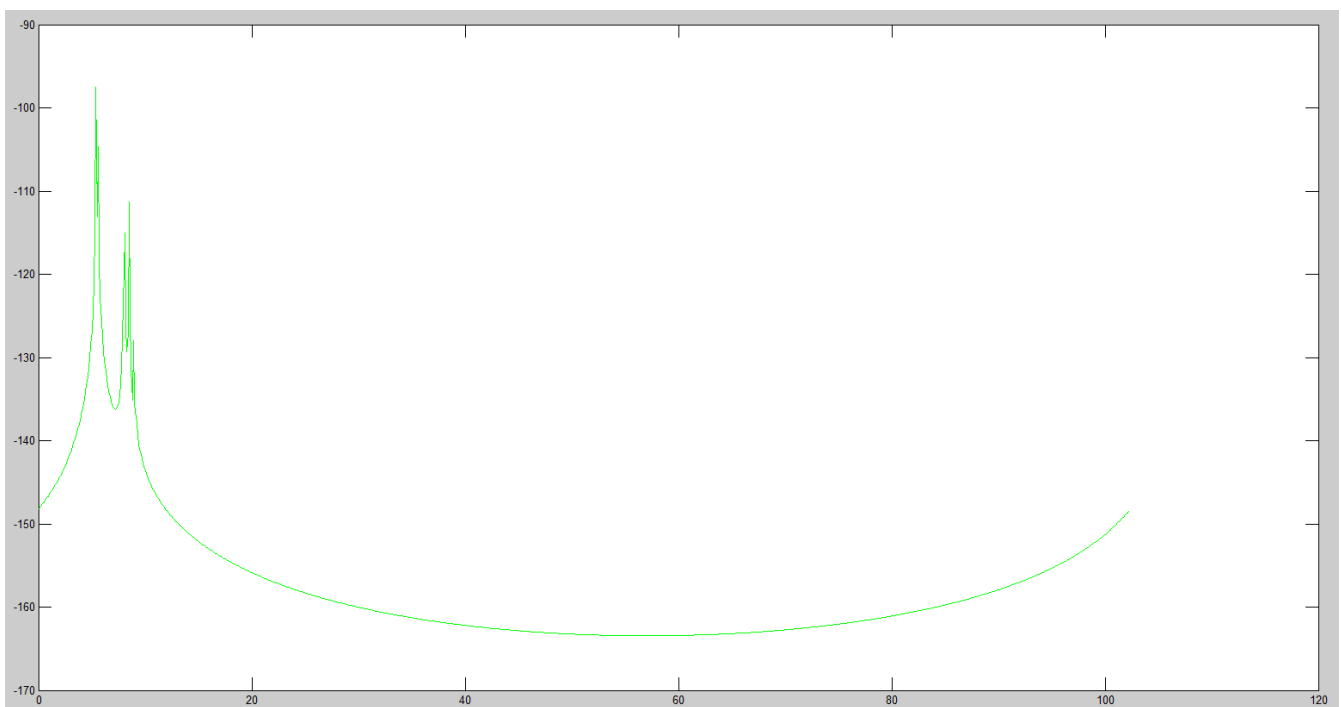
Posición	Relative received power Pr (dB)		Delay spread DS (nanosegundos)		Maximum excess delay MED (nanosegundos)		Pérdidas (dB)	
	VV	HH	VV	HH	VV	HH	VV	HH
1	-90,46	-89,89	4,88	3,33	39,33	38,33	90,46	89,89
2	-90,49	-89,91	5,72	5,09	42,33	41,66	90,49	89,91
3	-89,36	-87,97	5,90	4,94	37,66	37,33	89,36	87,97
4	-87,97	-89,03	4,38	6,96	30,00	37,00	87,97	89,03
5	-90,90	-92,92	6,96	7,63	40,66	41,66	90,90	92,92
6	-89,53	-89,42	4,99	3,69	38,33	33,66	89,53	89,42
7	-87,28	-89,41	3,62	5,77	34,00	42,66	87,28	89,41
8	-88,95	-91,80	7,00	9,21	49,33	45,33	88,95	91,80
9	-90,19	-92,09	4,82	9,98	32,00	44,00	90,19	92,09
10	-86,16	-85,06	3,95	2,79	31,66	27,00	86,16	85,06
11	-85,61	-82,56	3,65	2,74	23,33	24,00	85,61	82,56
12	-83,55	-88,32	0,83	4,30	12,66	31,33	83,55	88,32
13	-86,42	-88,12	3,87	2,08	37,00	27,33	86,42	88,12
14	-87,34	-80,55	7,56	0,94	48,33	16,00	87,34	80,55
15	-82,10	-86,62	4,30	4,10	23,00	29,33	82,10	86,62

Media	-87,75	-88,24	4,83	4,90	34,64	34,44	87,75	88,24
--------------	--------	--------	------	------	-------	-------	-------	-------

Tabla 5. Parámetros obtenidos de las medidas a 94 GHz.

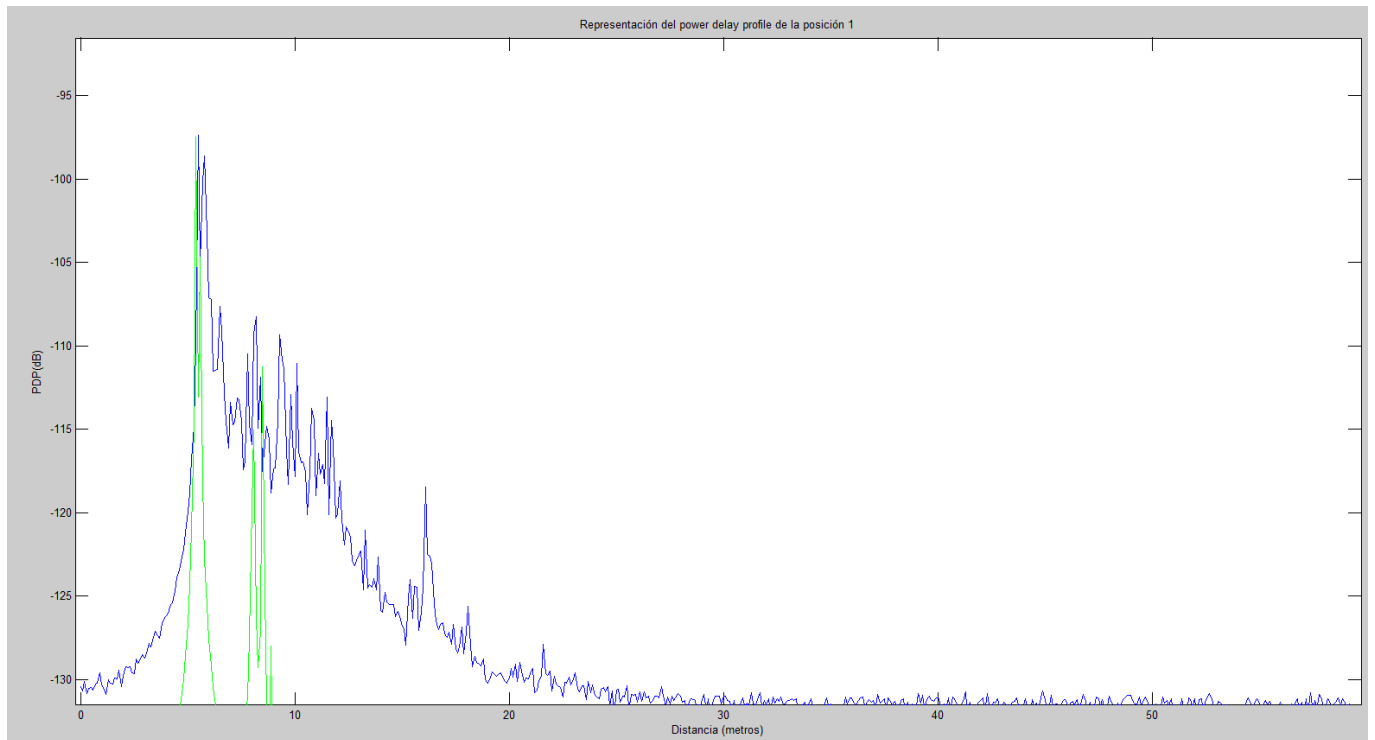
Una vez obtenidos los parámetros de las medidas, se procede a analizar los datos proporcionados por el trazador de rayos más profundamente.

El primer elemento a analizar será el power delay profile, al ser la función de la que se sacan todos los otros que permiten caracterizar el canal de propagación. El primero que se muestra en la gráfica 8 es el que se corresponde para el caso de simulación que contempla una sola reflexión como mecanismo de propagación.



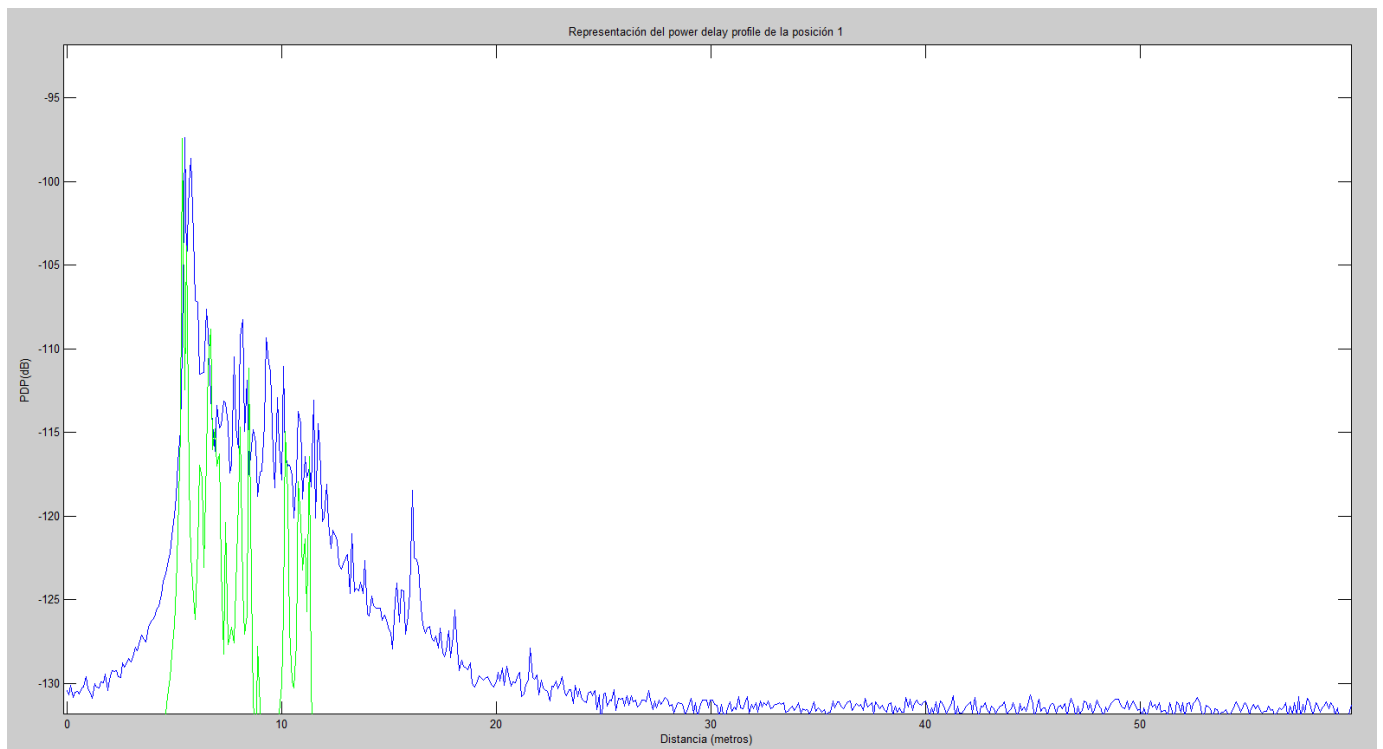
Gráfica 8. Simulación con una sola reflexión (I).

Al compararse con el obtenido mediante las mediciones (en azul) en la figura 9 se puede observar que la contribución directa es muy acertada tanto en la distancia recorrida así como en potencia recibida. Sin embargo, el resto del PDP difiere bastante entre ambos debido al poco 'realismo' de la simulación. Esto se solucionará añadiendo más mecanismos de propagación a la simulación, lo que supone también un aumento del tiempo de computación para la misma.



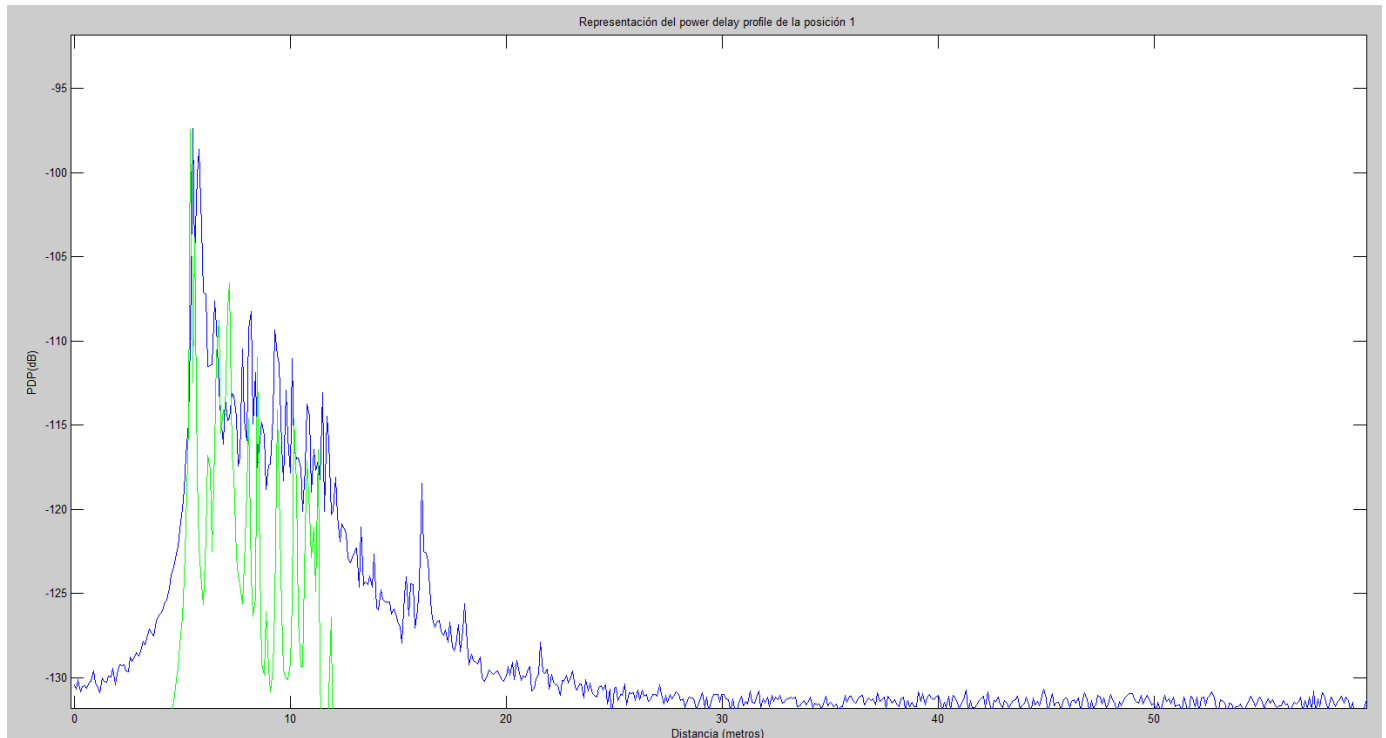
Gráfica 9. Comparación entre PDP simulado y medido (I).

En la figura 10 se muestra la comparación entre el PDP real y simulado para el caso de rayos que sufren una y dos reflexiones, así como aquellos que sufren un fenómeno de difracción.



Gráfica 10. Comparación entre PDP simulado y medido (II).

Los resultados de simulación mejoran, pero todavía se pueden mejorar aún más. En la figura 11 se muestra el caso más complejo de todos, en el cual, aparte de los mecanismos de propagación mencionados anteriormente, se incluye también el que contempla los rayos que han sido primero reflejados y luego difractados, así como viceversa.



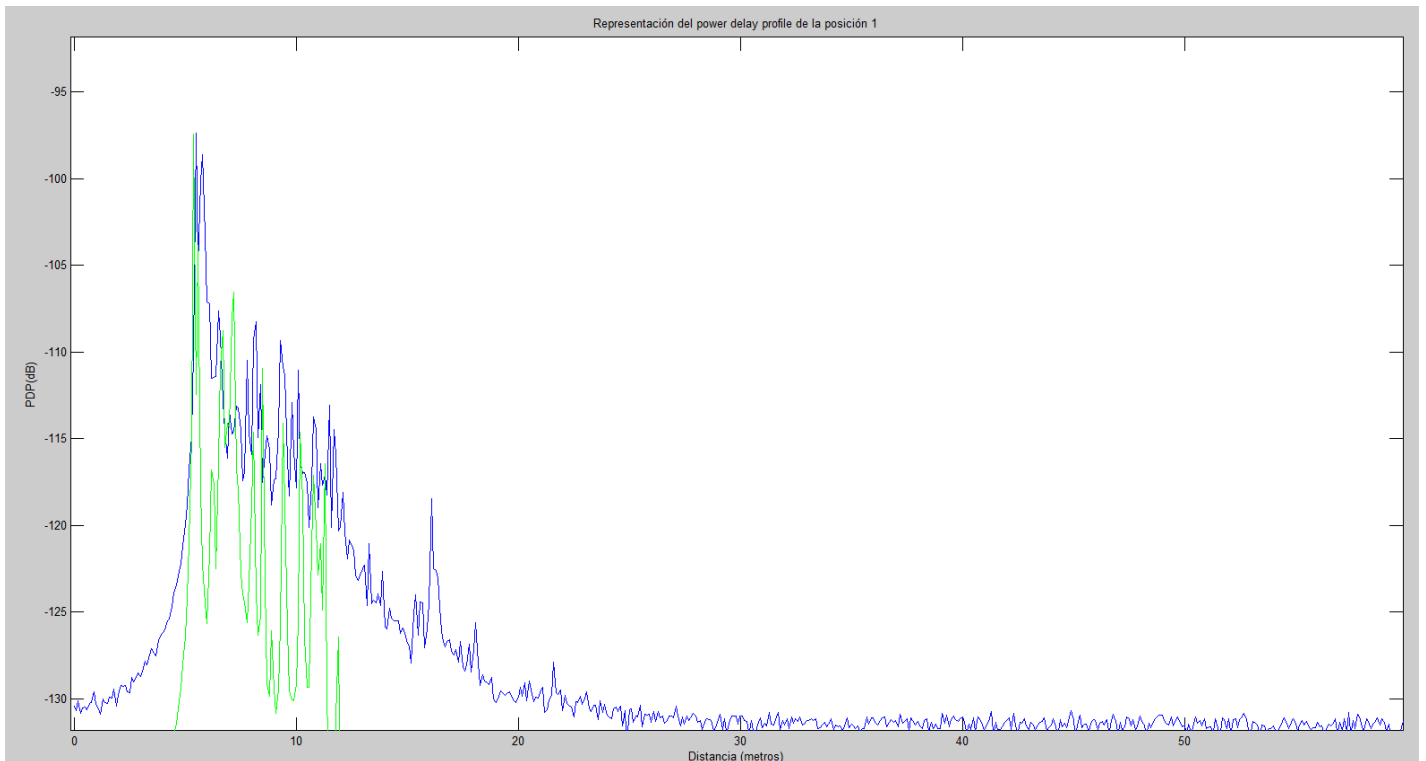
Gráfica 11. Comparación entre PDP simulado y medido (III).

Este es el caso de simulación más preciso y que mejor resultados arroja, por lo que será para el que se obtendrán los distintos parámetros de caracterización del canal simulado, así como los otros aspectos de interés mencionados en el apartado de metodología de análisis que se podían obtener a partir de la realización de las simulaciones.

Debido a que se han realizado muchos casos de simulación, los cuales a su vez contienen muchos datos, en la presente memoria sólo se pondrán parte de ellos con el objetivo de evitar que quede demasiado extensa. Se analizarán un total de cuatro posiciones, de las cuales dos serán con polarización copolar vertical y las otras dos con polarización copolar horizontal.

Posición 1 con polarización copolar vertical.

El power delay profile obtenido para esta posición es el siguiente. Se muestra a su vez el correspondiente a las medidas para esa misma posición.



Gráfica 12. Power delay profile de la posición 1.

Los parámetros de caracterización del canal obtenidos para la posición 1 han sido los que se muestran en la tabla 6.

Parámetros simulados para la posición 1	
Valor del delay spread (nseg)	3,79
Valor de las pérdidas (dB)	94,51
Valor de la potencia relativa recibida (dB)	-94,51
Valor del máximo excess delay (nseg)	37,67

Tabla 6. Parámetros del canal de la posición 1.

Los valores obtenidos de dispersión angular y valor medio de los ángulos de la posición 1 son los mostrados en las tablas 7 y 8.

Dispersión angular para la posición 1 (grados)	
Dispersión angular de salida en azimut	45,17
Dispersión angular de salida en elevación	9,21
Dispersión angular de llegada en azimut	55,29
Dispersión angular de llegada en elevación	9,01

Tabla 7. Dispersión angular para la posición 1.

Valor medio de los ángulos para la posición 1 (grados)	
Valor medio de salida en azimut	-13,15
Valor medio de salida en elevación	88,71
Valor medio de llegada en azimut	-10,64
Valor medio de llegada en elevación	85,56

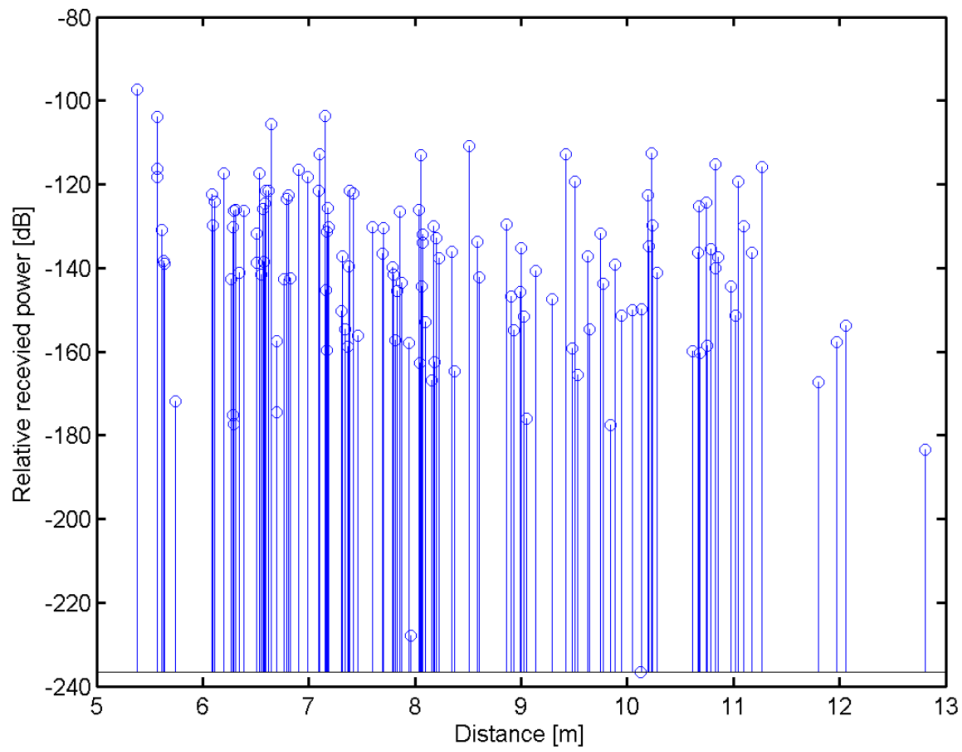
Tabla 8. Valor medio de los ángulos para la posición 1.

Otro parámetro de interés a tener en cuenta es el ángulo de salida del transmisor y el de llegada al receptor del rayo directo, al ser la contribución más energética. Sus valores para el caso de la posición 1 son los que se muestran en la tabla 9.

Posición	DoD	DoA
1	-24,37	24,37

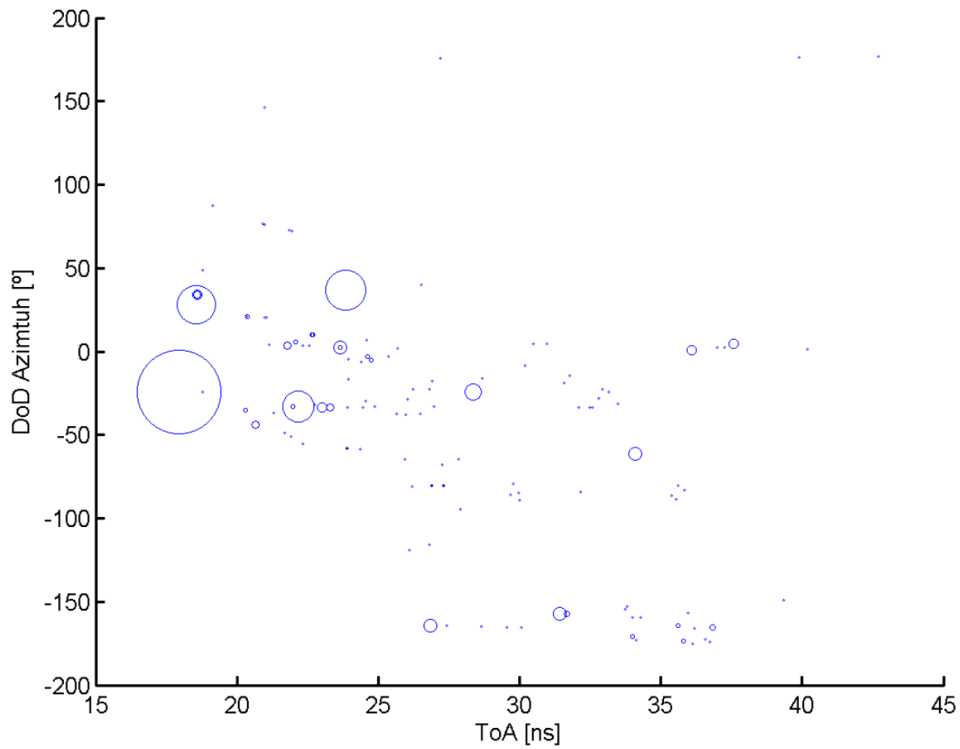
Tabla 9. Valor de los ángulos de llegada y salida de la posición 1.

Los valores obtenidos para la gráfica del CIR de la posición 1 son los siguientes.

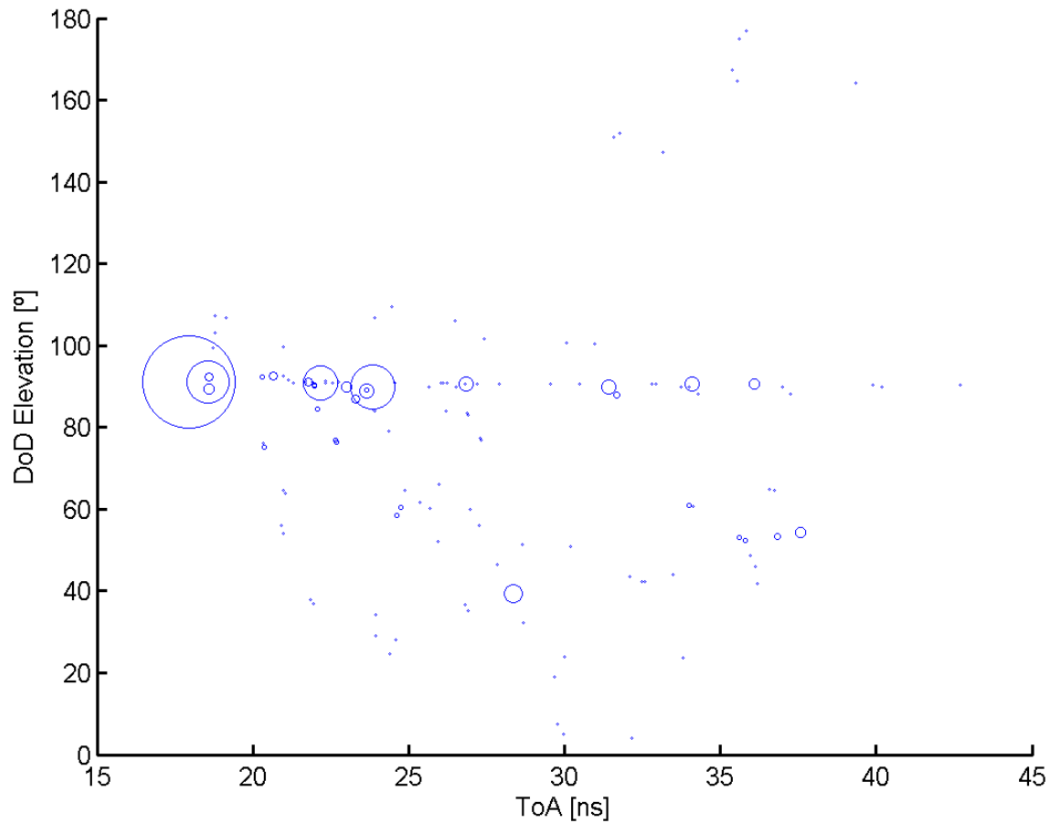


Gráfica 13. Gráfica del CIR para la posición 1.

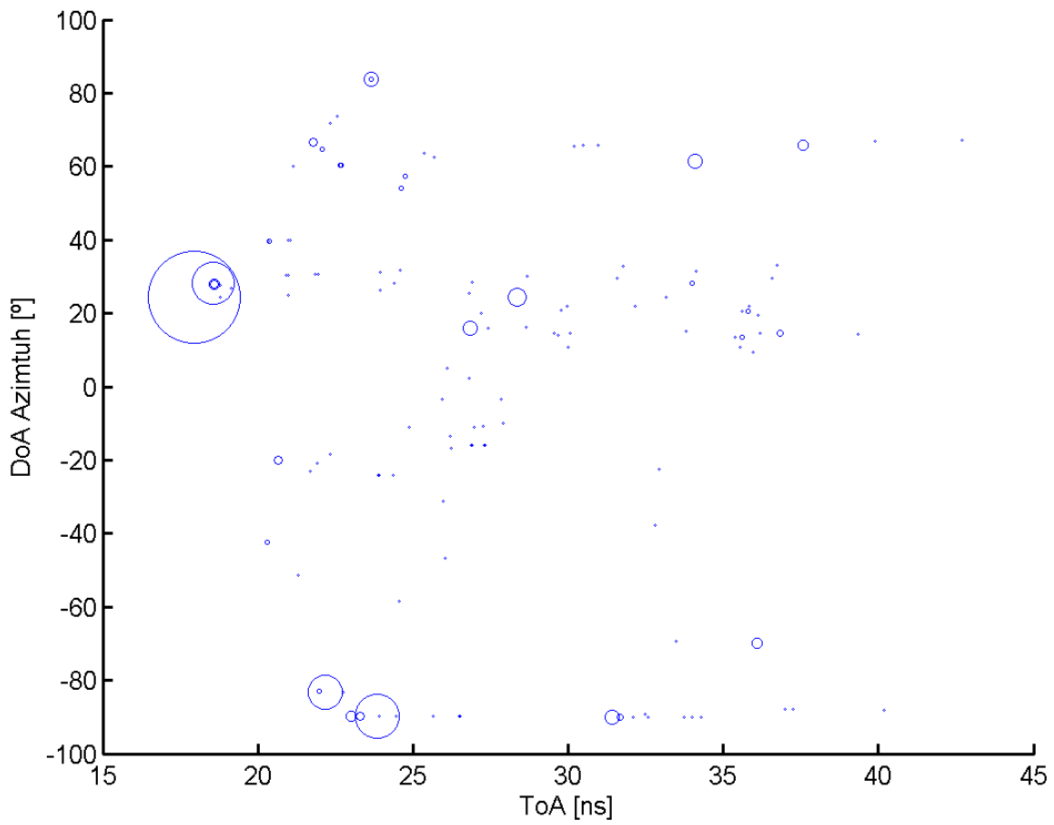
Las gráficas que relacionan el ángulo, la energía y el tiempo de llegada de las distintas contribuciones se muestran a continuación. Están para el caso de DoD y DoA en ambos planos de azimut y elevación.



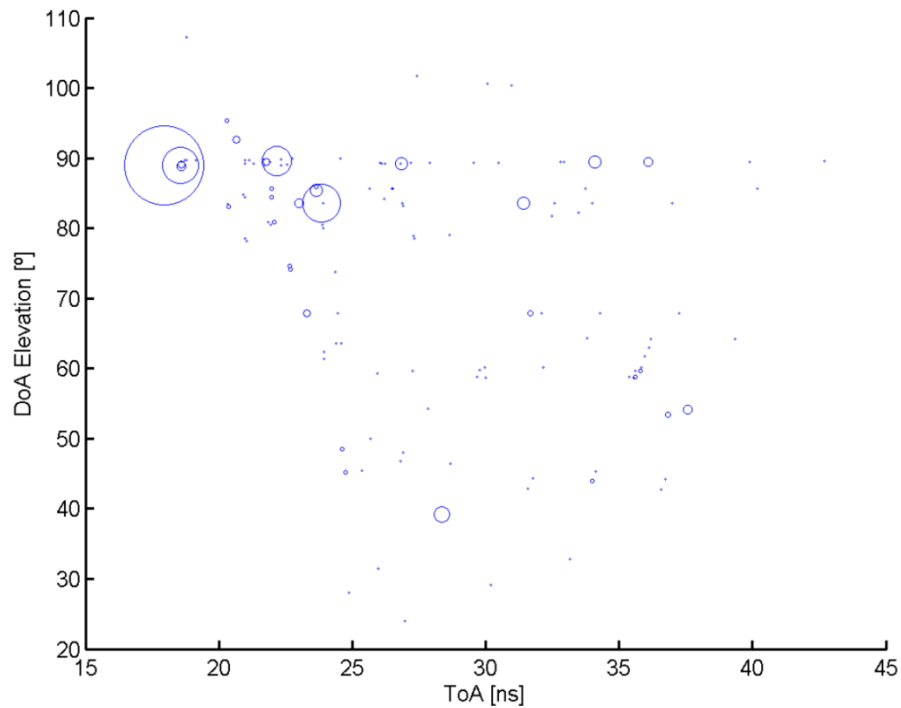
Gráfica 14. Direcciones de salida en azimut para la posición 1.



Gráfica 15. Direcciones de salida en elevación para la posición 1.



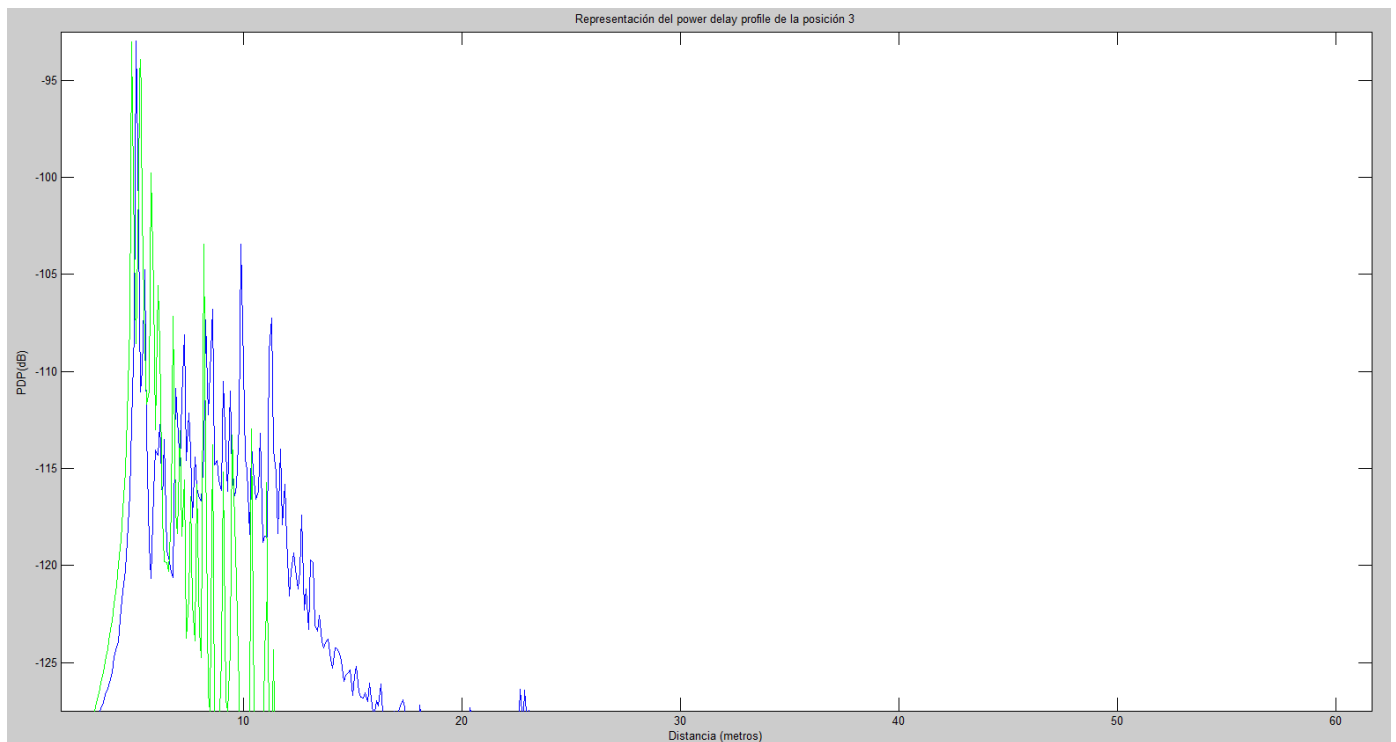
Gráfica 16. Direcciones de llegada en azimuth para la posición 1.



Gráfica 17. Direcciones de llegada en elevación para la posición 1.

Posición 3 con polarización copolar vertical.

El power delay profile obtenido para esta posición es el siguiente. Se muestra a su vez el correspondiente a las medidas para esa misma posición.



Gráfica 18. Power delay profile de la posición 3.

Los parámetros de caracterización del canal obtenidos para la posición 3 han sido los que se muestran en la tabla 10.

Parámetros simulados para la posición 3	
Valor del delay spread (nseg)	1,89
Valor de las pérdidas (dB)	87,22
Valor de la potencia relativa recibida (dB)	-87,22
Valor del máximo excess delay (nseg)	27,33

Tabla 10. Parámetros del canal de la posición 3.

Los valores obtenidos de dispersión angular y valor medio de los ángulos de la posición 3 son los mostrados en las tablas 11 y 12.

Dispersión angular para la posición 3 (grados)	
Dispersión angular de salida en azimut	37,31
Dispersión angular de salida en elevación	3,62
Dispersión angular de llegada en azimut	31,26
Dispersión angular de llegada en elevación	4,27

Tabla 11. Dispersión angular para la posición 3.

Valor medio de los ángulos para la posición 3 (grados)	
Valor medio de salida en azimut	-13,76
Valor medio de salida en elevación	90,74
Valor medio de llegada en azimut	-16,93
Valor medio de llegada en elevación	88,19

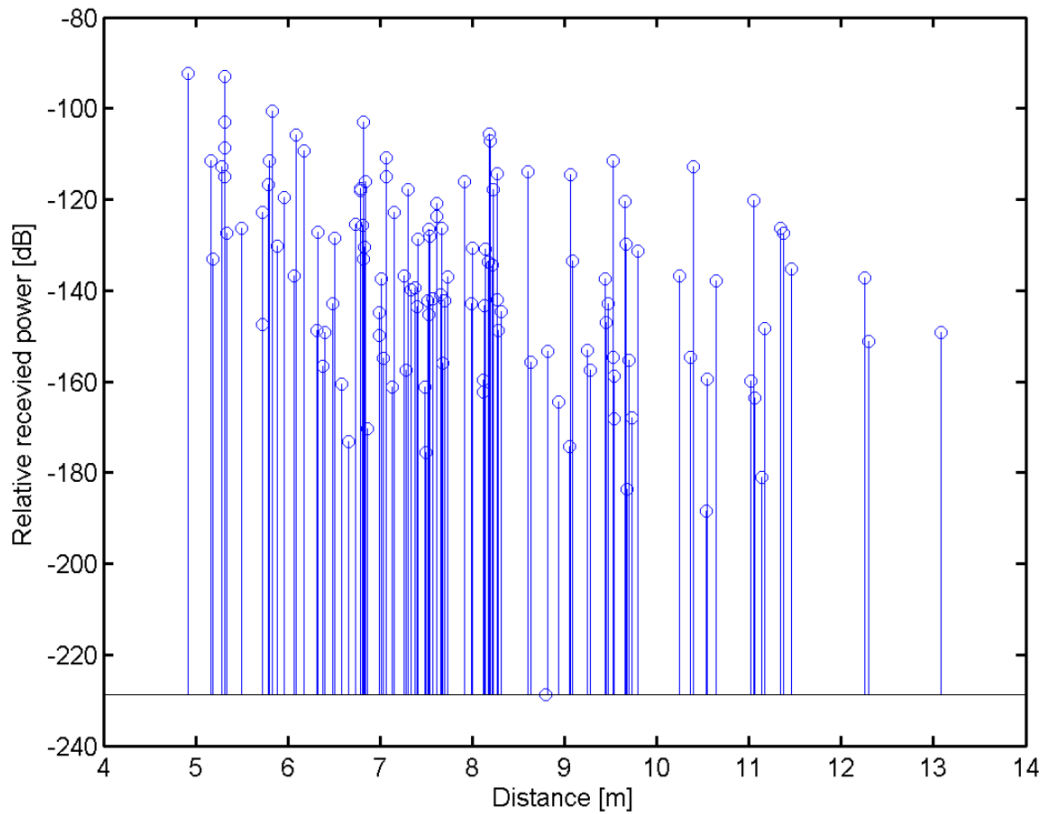
Tabla 12. Valor medio de los ángulos para la posición 3.

Los valores de los ángulos de salida del transmisor y el de llegada al receptor del rayo directo para la posición 3 son los que se muestran en la tabla 13.

Posición	DoD	DoA
3	-2,43	2,43

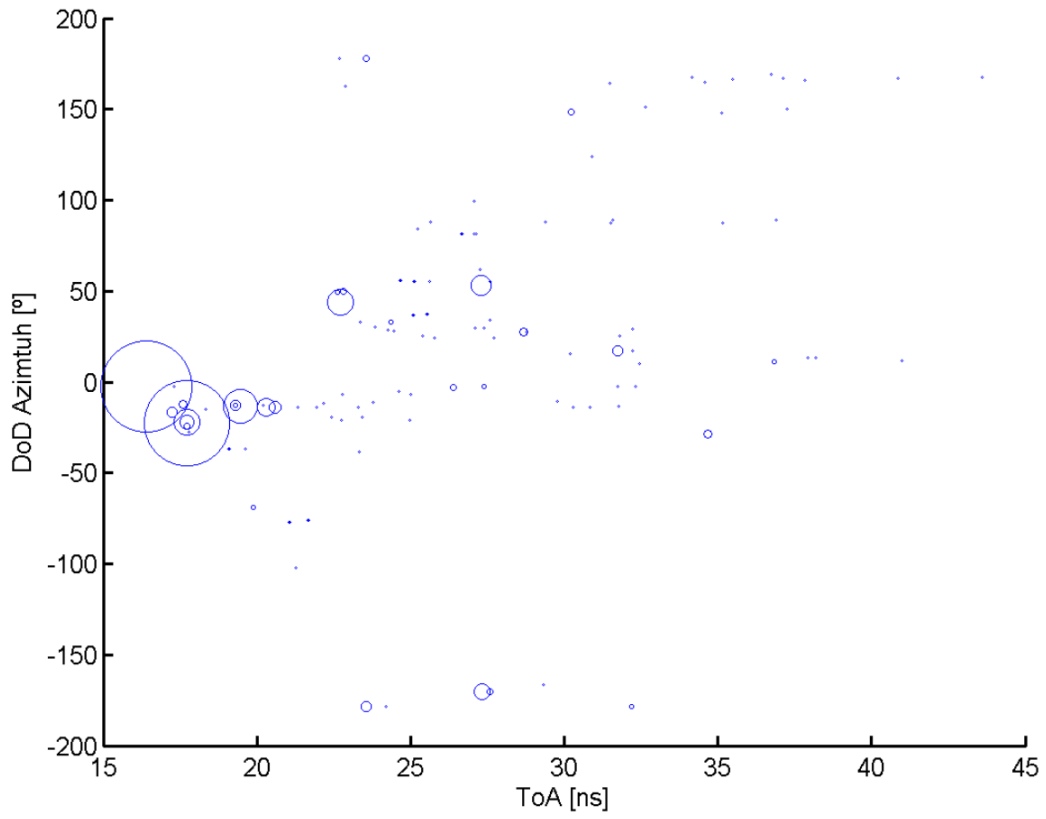
Tabla 13. Valor de los ángulos de llegada y salida de la posición 3.

Los valores obtenidos para la gráfica del CIR de la posición 3 son los siguientes.

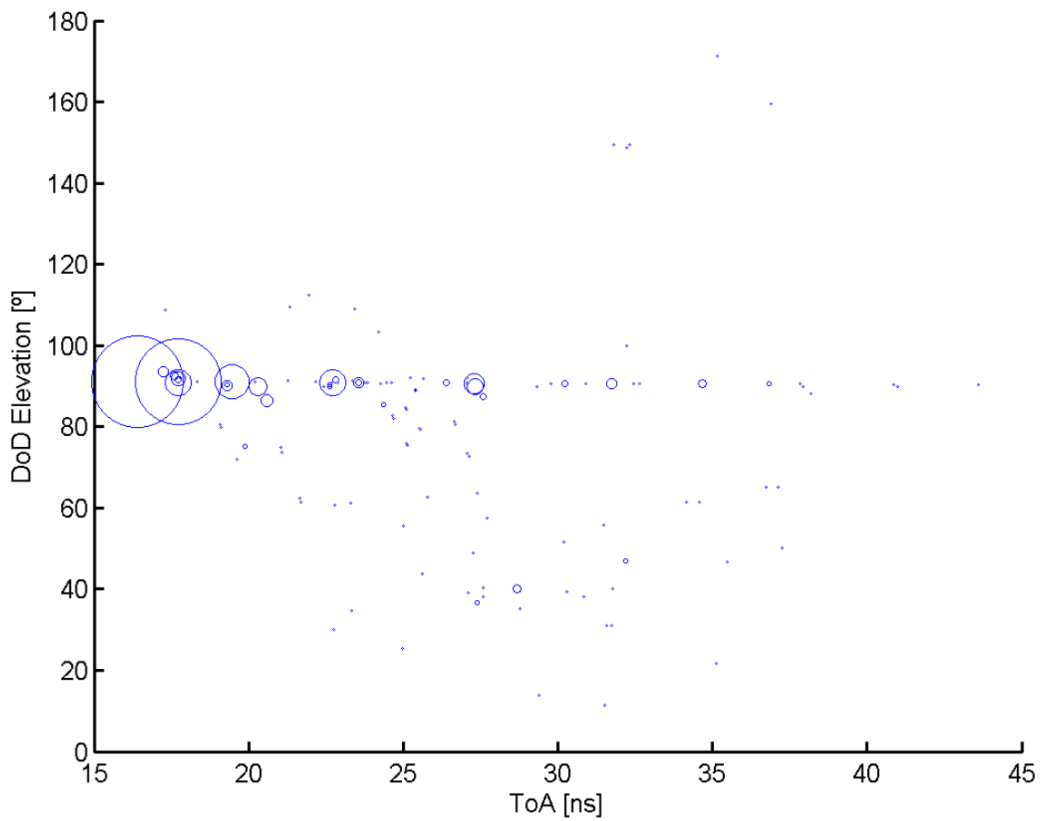


Gráfica 19. Gráfica del CIR para la posición 3.

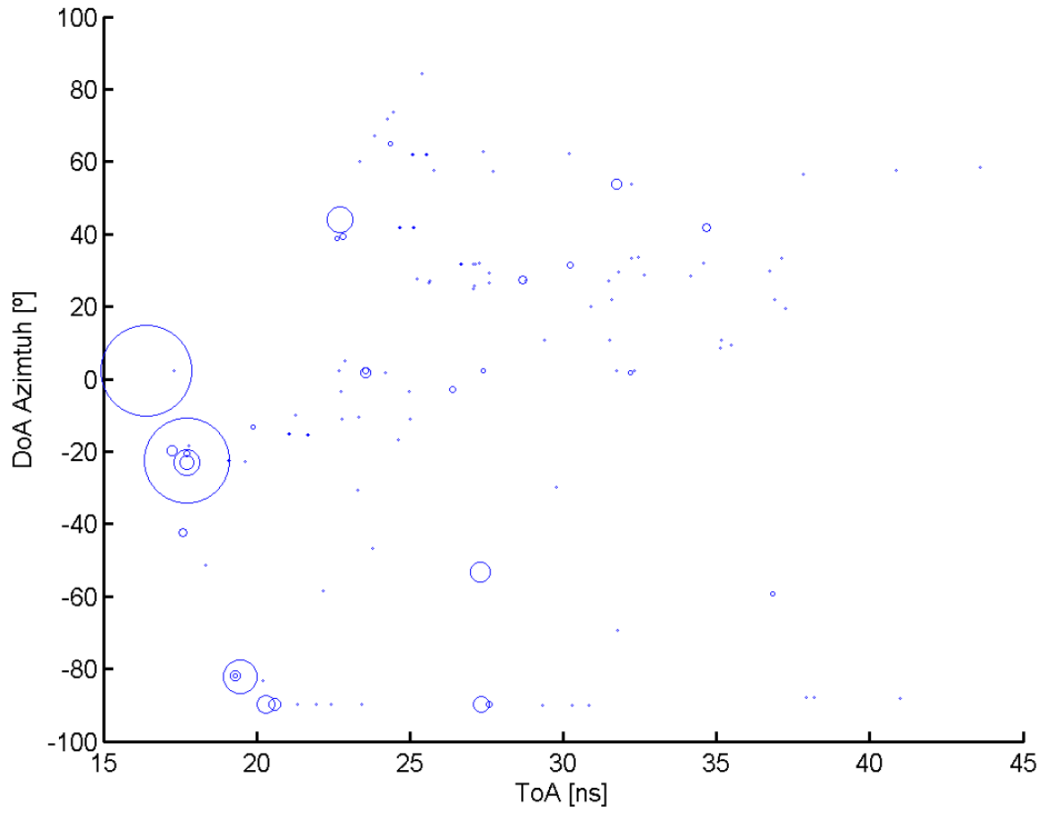
Las gráficas que relacionan el ángulo, la energía y el tiempo de llegada de las distintas contribuciones se muestran a continuación. Están para el caso de DoD y DoA en ambos planos de azimut y elevación.



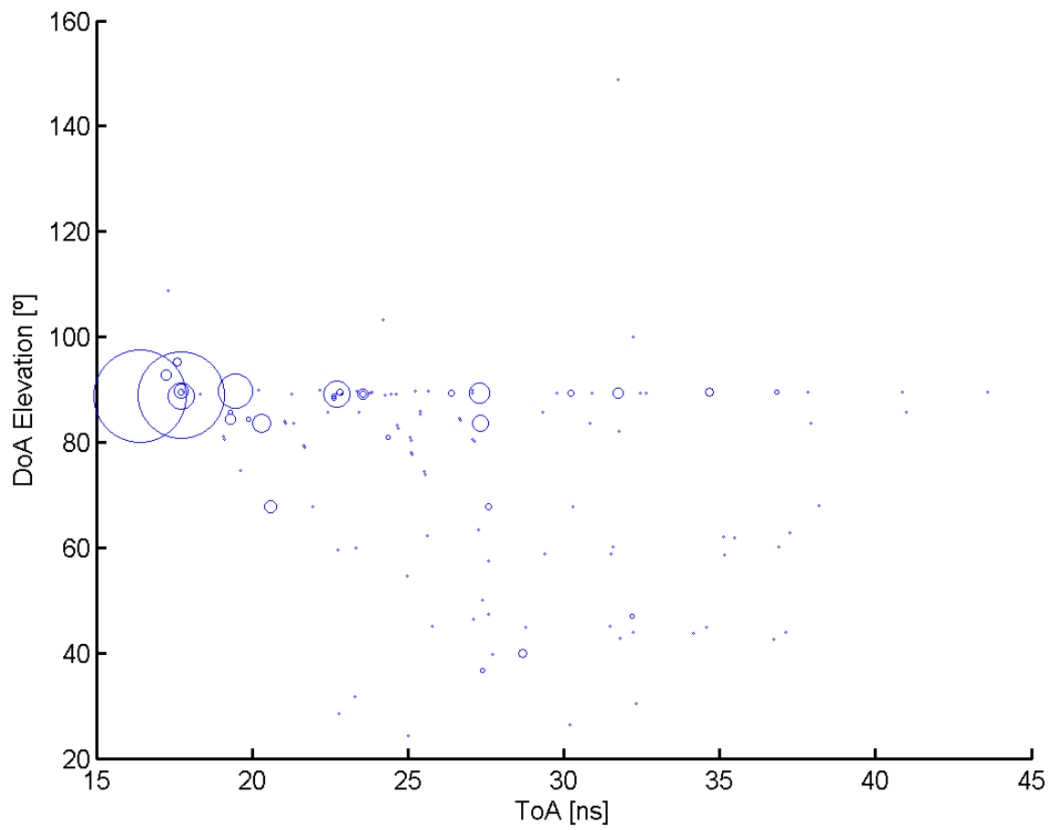
Gráfica 20. Direcciones de salida en azimuth para la posición 3.



Gráfica 21. Direcciones de salida en elevación para la posición 3.



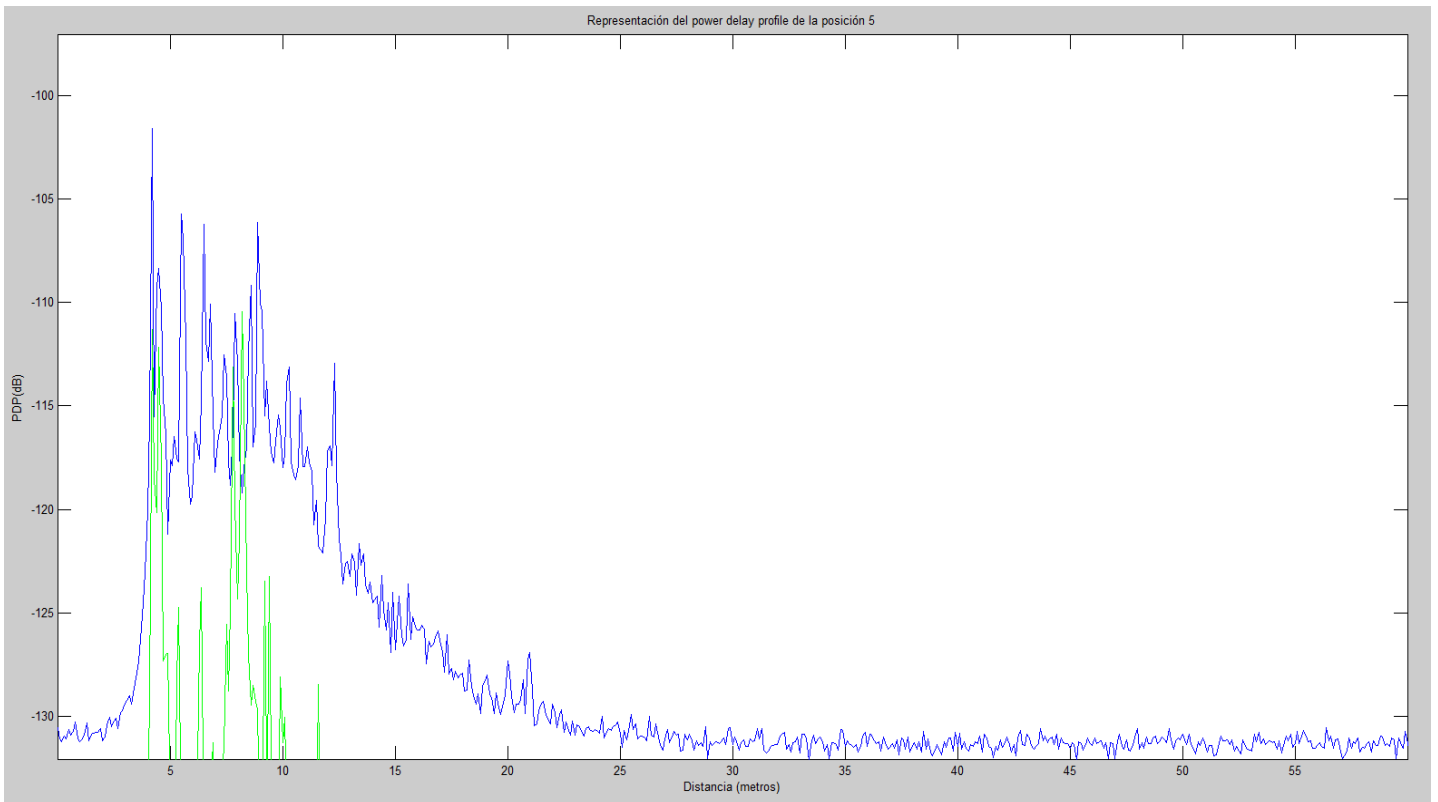
Gráfica 22. Direcciones de Llegada en azimuth para la posición 3.



Gráfica 23. Direcciones de Llegada en elevación para la posición 3.

Posición 5 con polarización copolar horizontal.

El power delay profile obtenido para esta posición es el siguiente. Se muestra a su vez el correspondiente a las medidas para esa misma posición.



Gráfica 24. Power delay profile de la posición 5.

Puede observarse que hay una segunda componente que tiene mucha potencia, seguramente debido a la reflexión en alguna superficie metálica.

Los parámetros de caracterización del canal obtenidos para la posición 5 han sido los que se muestran en la tabla 14.

Parámetros simulados para la posición 5	
Valor del delay spread (nseg)	6,37
Valor de las pérdidas (dB)	105,63
Valor de la potencia relativa recibida (dB)	-105,63
Valor del máximo excess delay (nseg)	38,67

Tabla 14. Parámetros del canal de la posición 5.

Los valores obtenidos de dispersión angular y valor medio de los ángulos de la posición 5 son los mostrados en las tablas 15 y 16.

Dispersión angular para la posición 5 (grados)	
Dispersión angular de salida en azimut	68,34
Dispersión angular de salida en elevación	26,35
Dispersión angular de llegada en azimut	22,94
Dispersión angular de llegada en elevación	26,59

Tabla 15. Dispersión angular para la posición 5.

Valor medio de los ángulos para la posición 5 (grados)	
Valor medio de salida en azimut	-66,50
Valor medio de salida en elevación	85,26
Valor medio de llegada en azimut	0,18
Valor medio de llegada en elevación	83,75

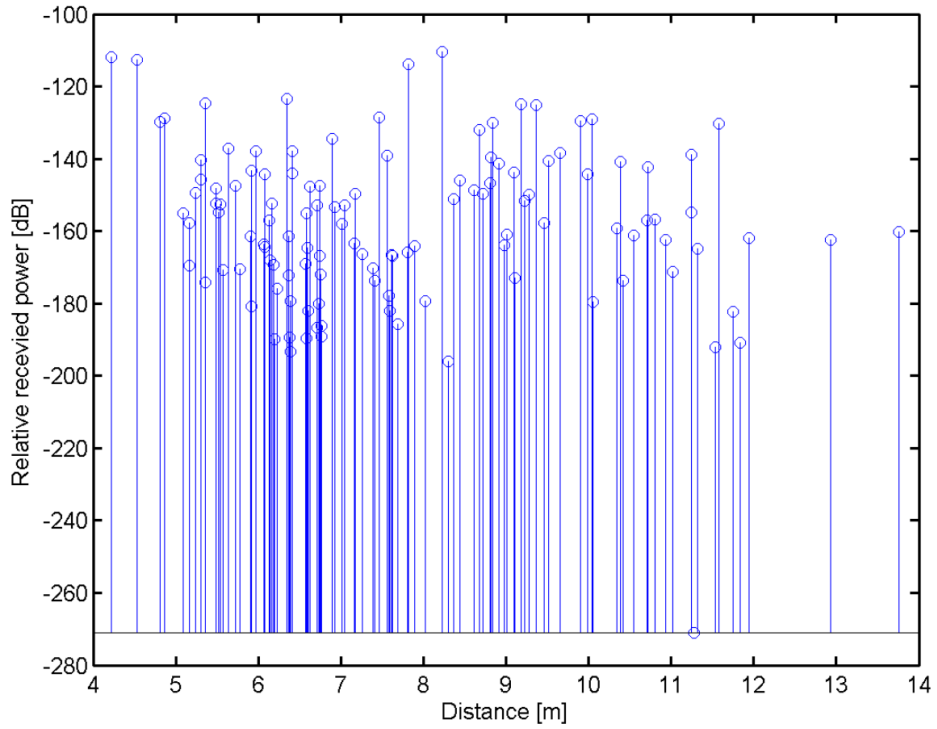
Tabla 16. Valor medio de los ángulos para la posición 5.

Los valores de los ángulos de salida del transmisor y el de llegada al receptor del rayo directo para la posición 5 son los que se muestran en la tabla 17.

Posición	DoD	DoA
5	-16,21	16,21

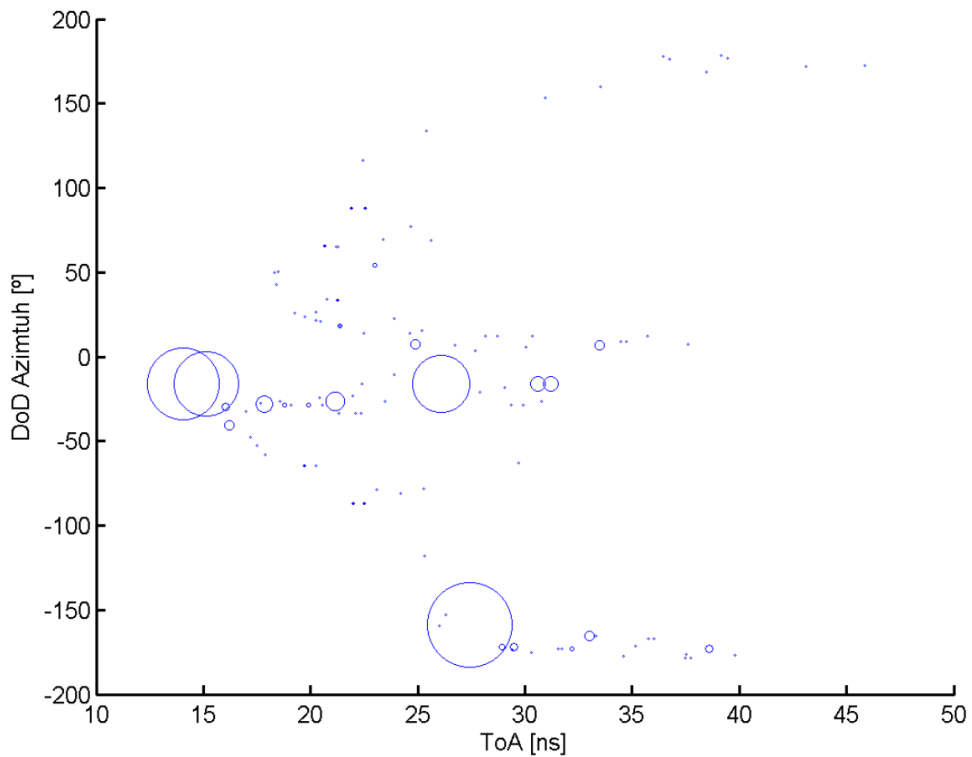
Tabla 17. Valor de los ángulos de llegada y salida de la posición 5.

Los valores obtenidos para la gráfica del CIR de la posición 5 son los siguientes.

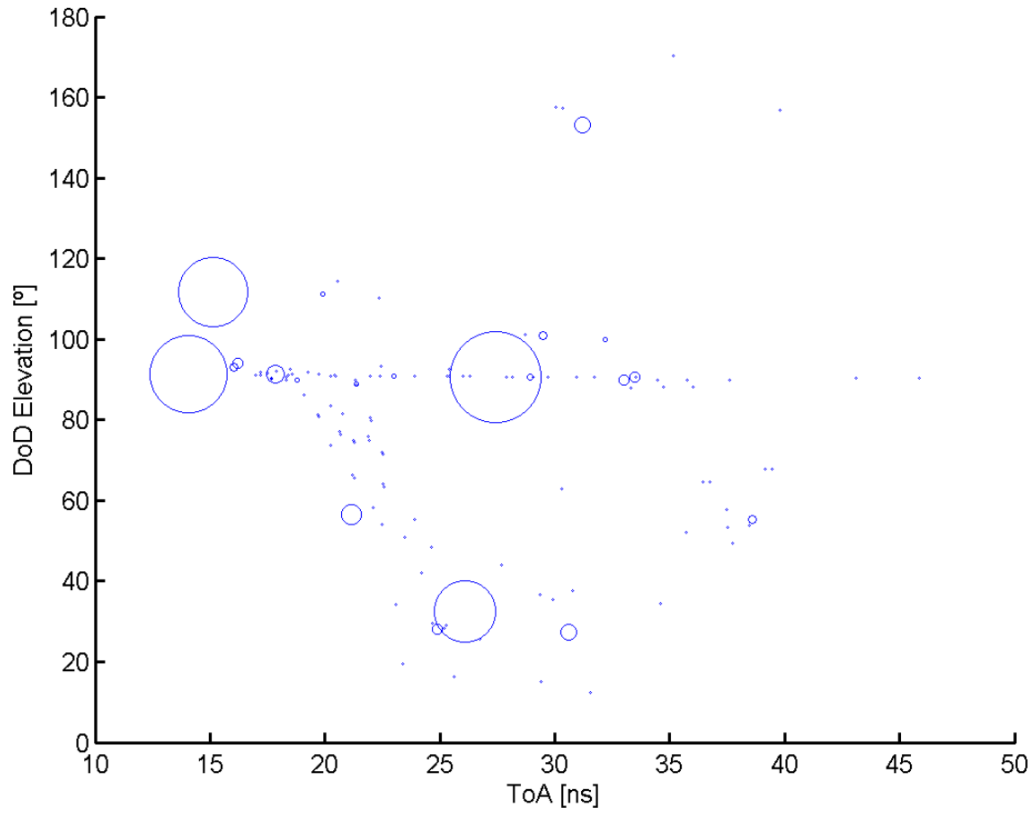


Gráfica 25. Gráfica del CIR para la posición 5.

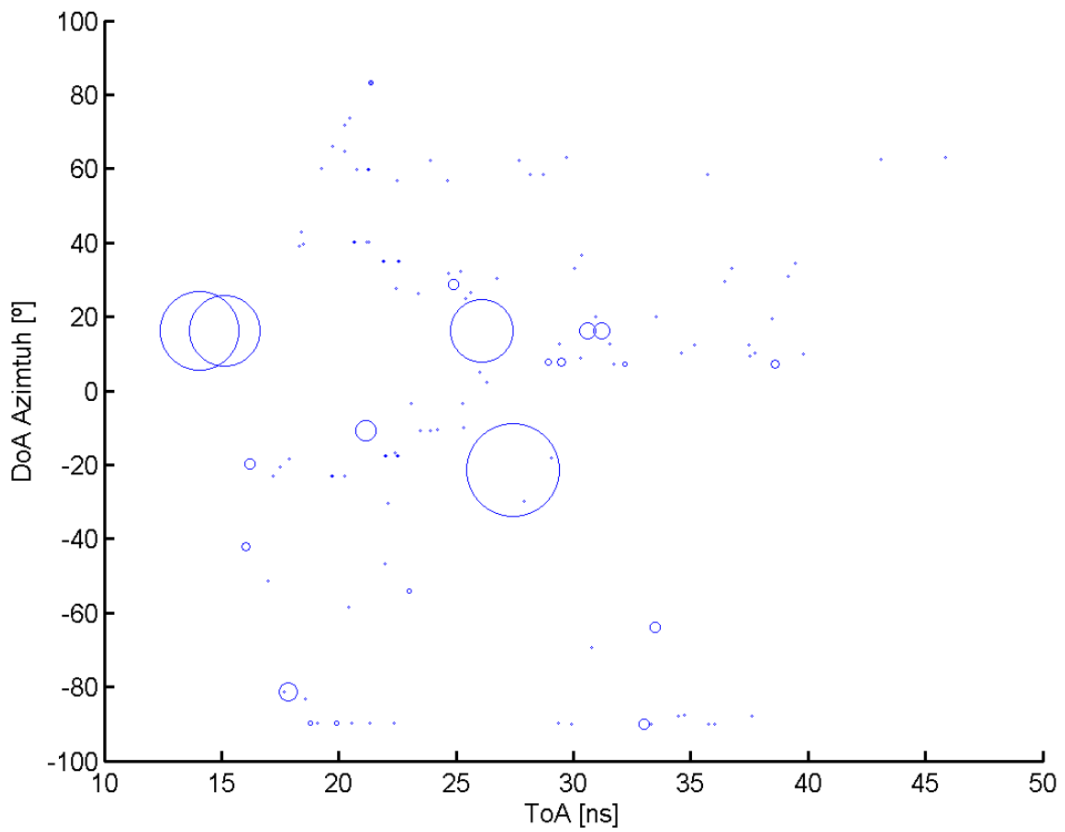
Las gráficas que relacionan el ángulo, la energía y el tiempo de llegada de las distintas contribuciones se muestran a continuación. Están para el caso de DoD y DoA en ambos planos de azimut y elevación.



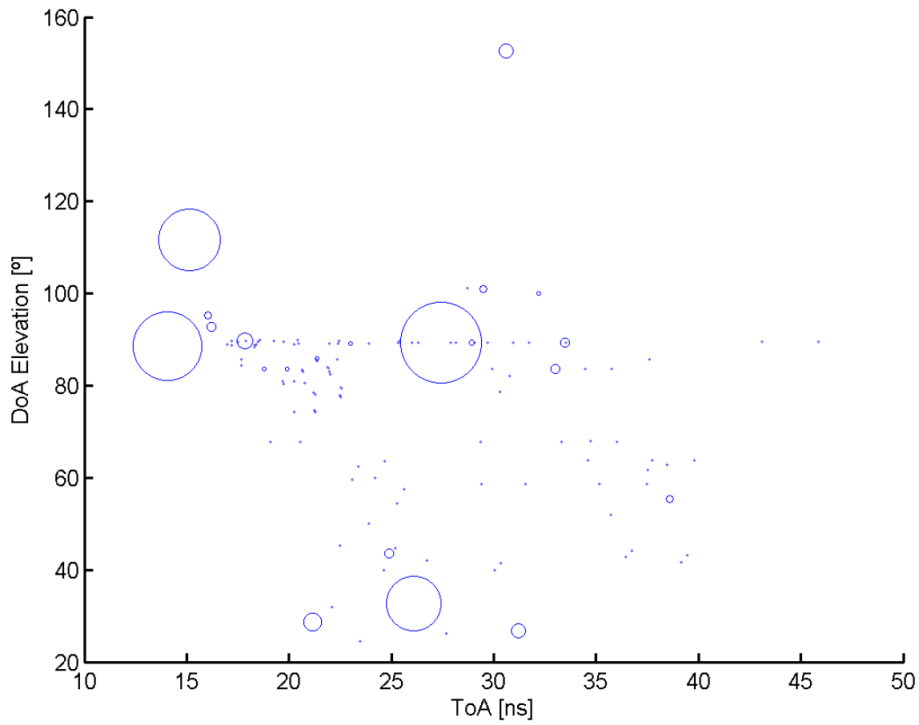
Gráfica 26. Direcciones de salida en azimut para la posición 5.



Gráfica 27. Direcciones de salida en elevación para la posición 5.



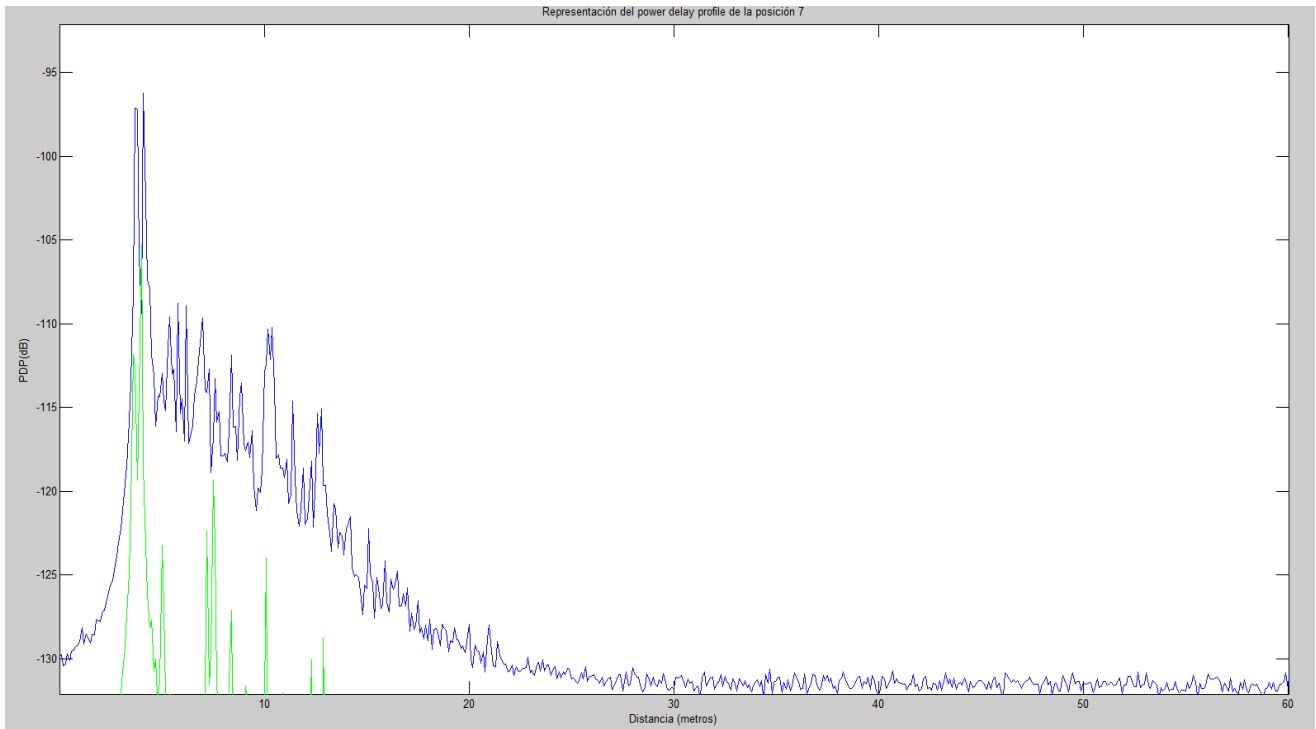
Gráfica 28. Direcciones de llegada en azimut para la posición 5.



Gráfica 29. Direcciones de llegada en elevación para la posición 5.

Posición 7 con polarización copolar horizontal.

El power delay profile obtenido para esta posición es el siguiente. Se muestra a su vez el correspondiente a las medidas para esa misma posición.



Gráfica 30. Power delay profile de la posición 7.

Los parámetros de caracterización del canal obtenidos para la posición 7 han sido los que se muestran en la tabla 18.

Parámetros simulados para la posición 7	
Valor del delay spread (nseg)	3,00
Valor de las pérdidas (dB)	104,45
Valor de la potencia relativa recibida (dB)	-104,45
Valor del máximo excess delay (nseg)	33,67

Tabla 18. Parámetros del canal de la posición 7.

Los valores obtenidos de dispersión angular y valor medio de los ángulos de la posición 7 son los mostrados en las tablas 19 y 20.

Dispersión angular para la posición 7 (grados)	
Dispersión angular de salida en azimut	45,11
Dispersión angular de salida en elevación	14,18
Dispersión angular de llegada en azimut	10,08
Dispersión angular de llegada en elevación	14,33

Tabla 19. Dispersión angular para la posición 7.

Valor medio de los ángulos para la posición 7 (grados)	
Valor medio de salida en azimut	9,55
Valor medio de salida en elevación	91,39
Valor medio de llegada en azimut	39,66
Valor medio de llegada en elevación	88,43

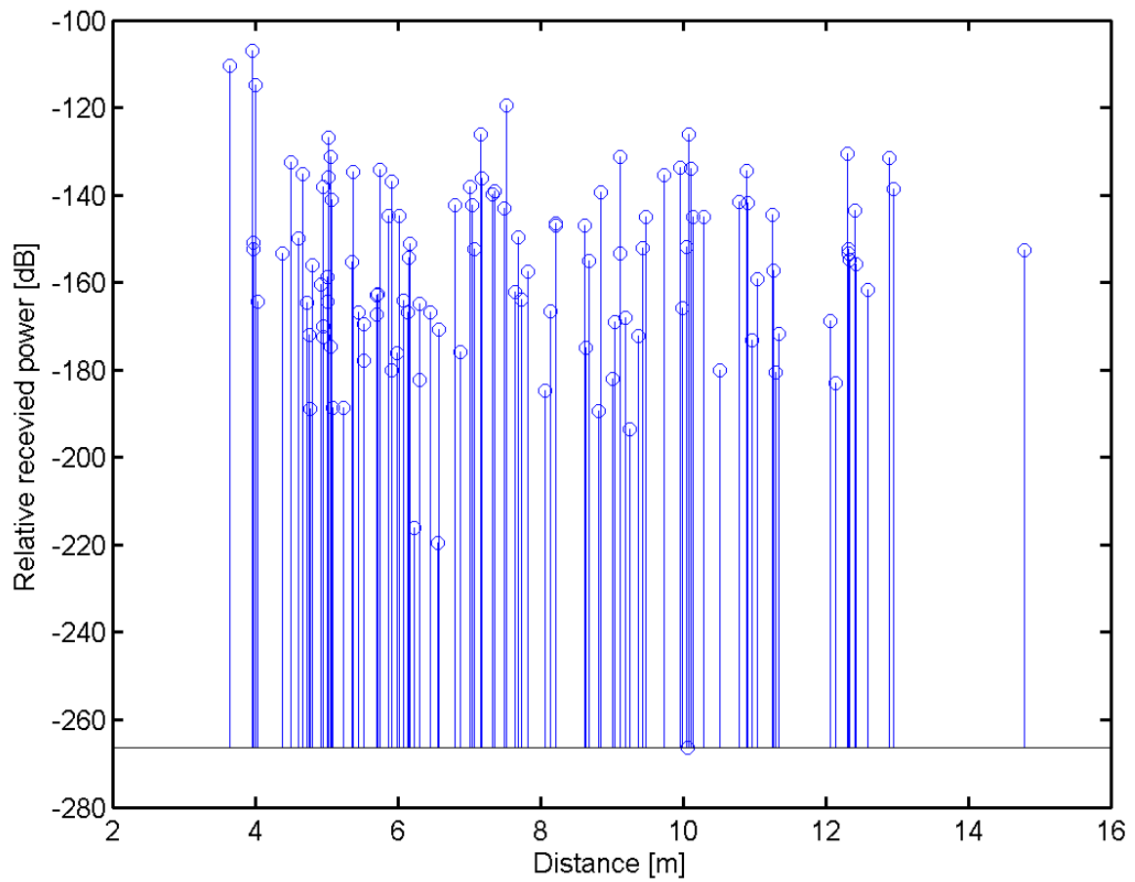
Tabla 20. Valor medio de los ángulos para la posición 7.

Los valores de los ángulos de salida del transmisor y el de llegada al receptor del rayo directo para la posición 7 son los que se muestran en la tabla 21.

Posición	DoD	DoA
7	-36,64	36,64

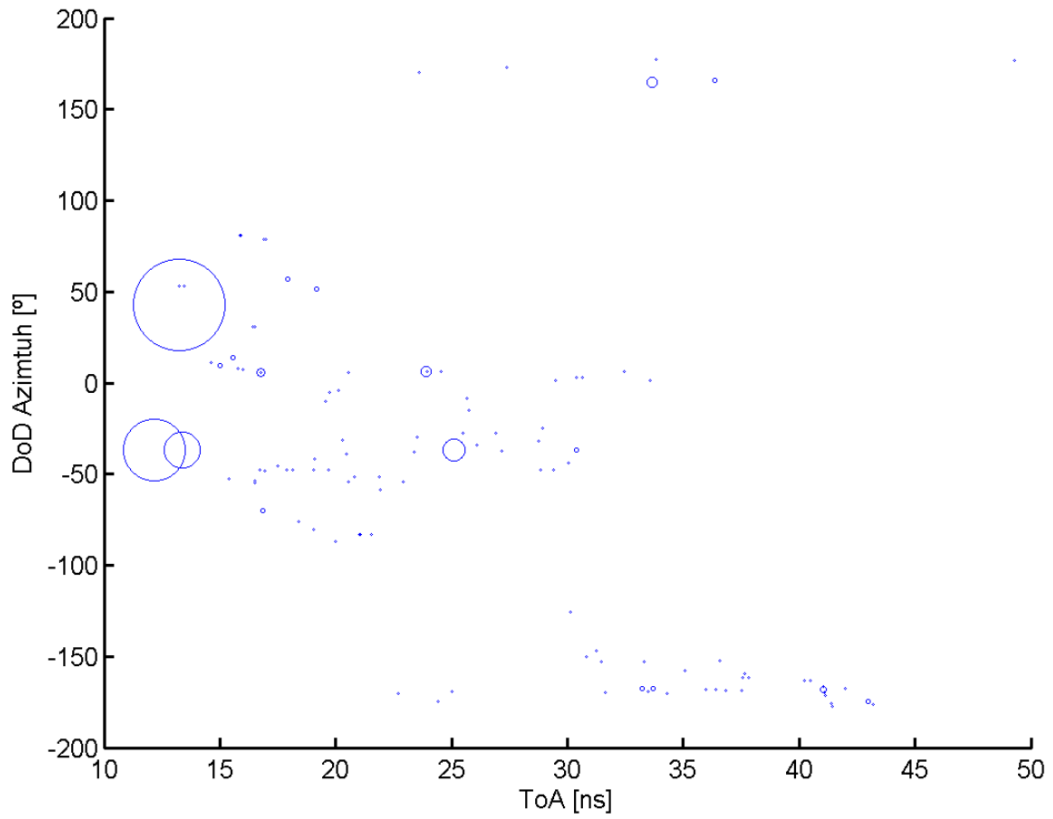
Tabla 21. Valor de los ángulos de llegada y salida de la posición 7.

Los valores obtenidos para la gráfica del CIR de la posición 7 son los siguientes.

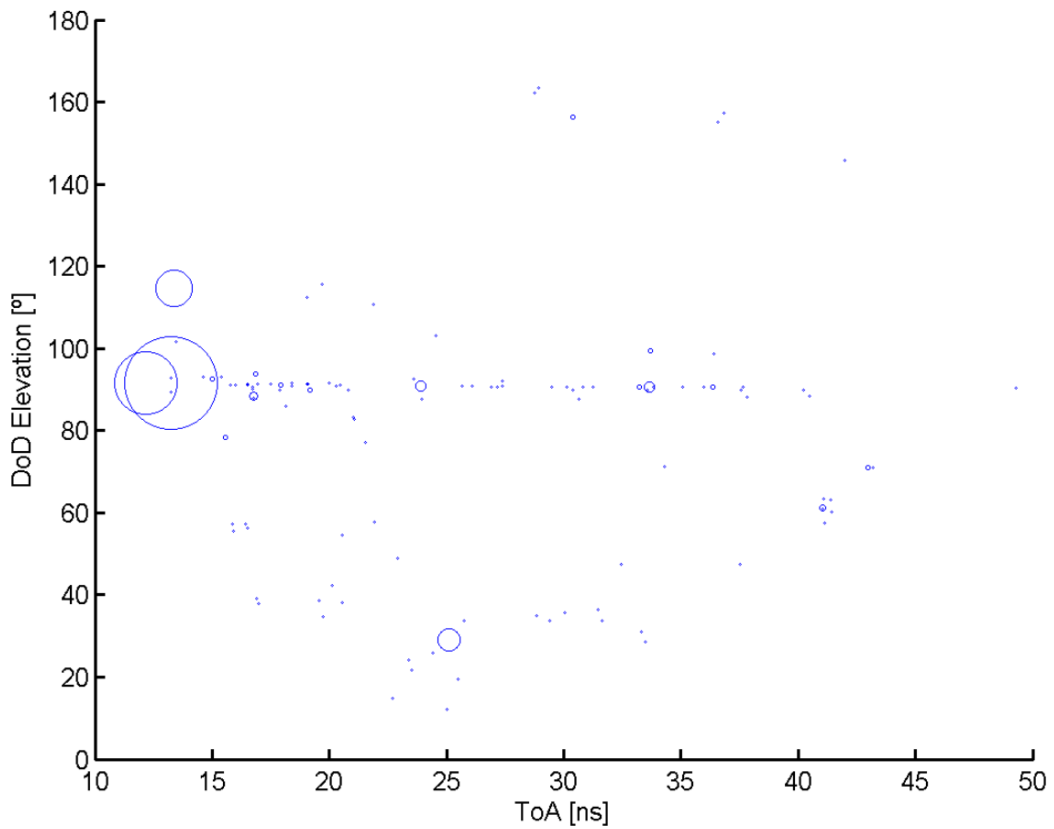


Gráfica 31. Gráfica del CIR para la posición 7.

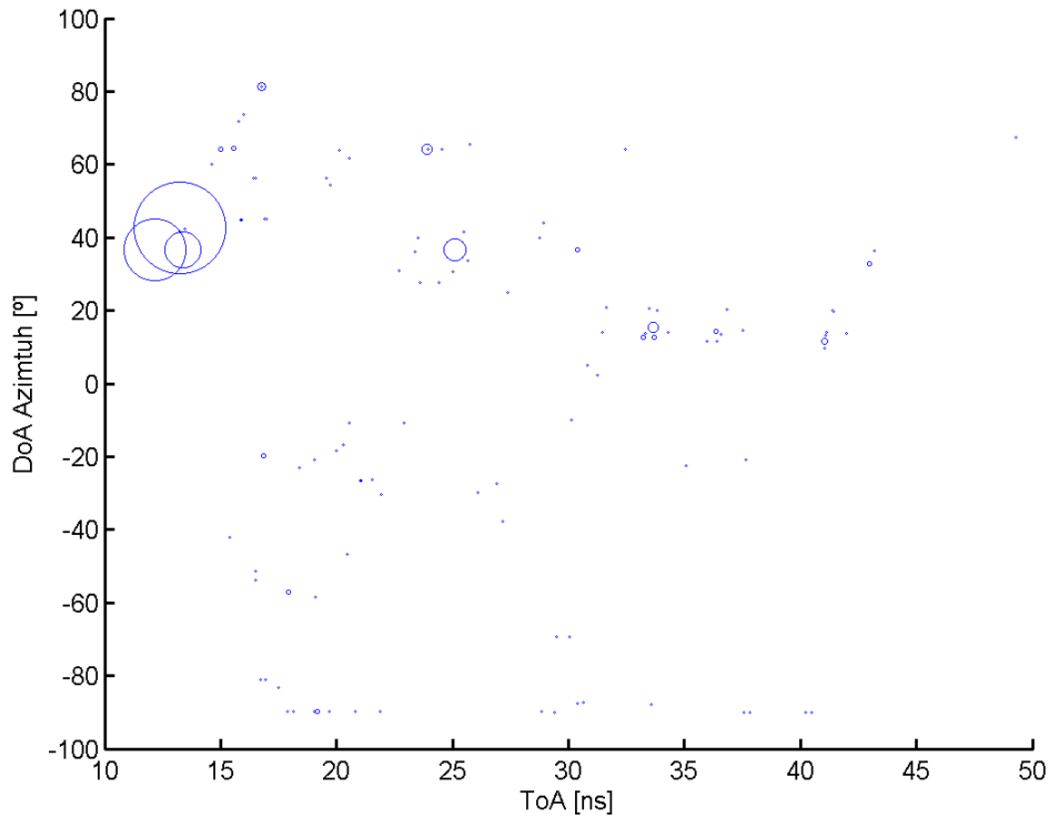
Las gráficas que relacionan el ángulo, la energía y el tiempo de llegada de las distintas contribuciones se muestran a continuación. Están para el caso de DoD y DoA en ambos planos de azimut y elevación.



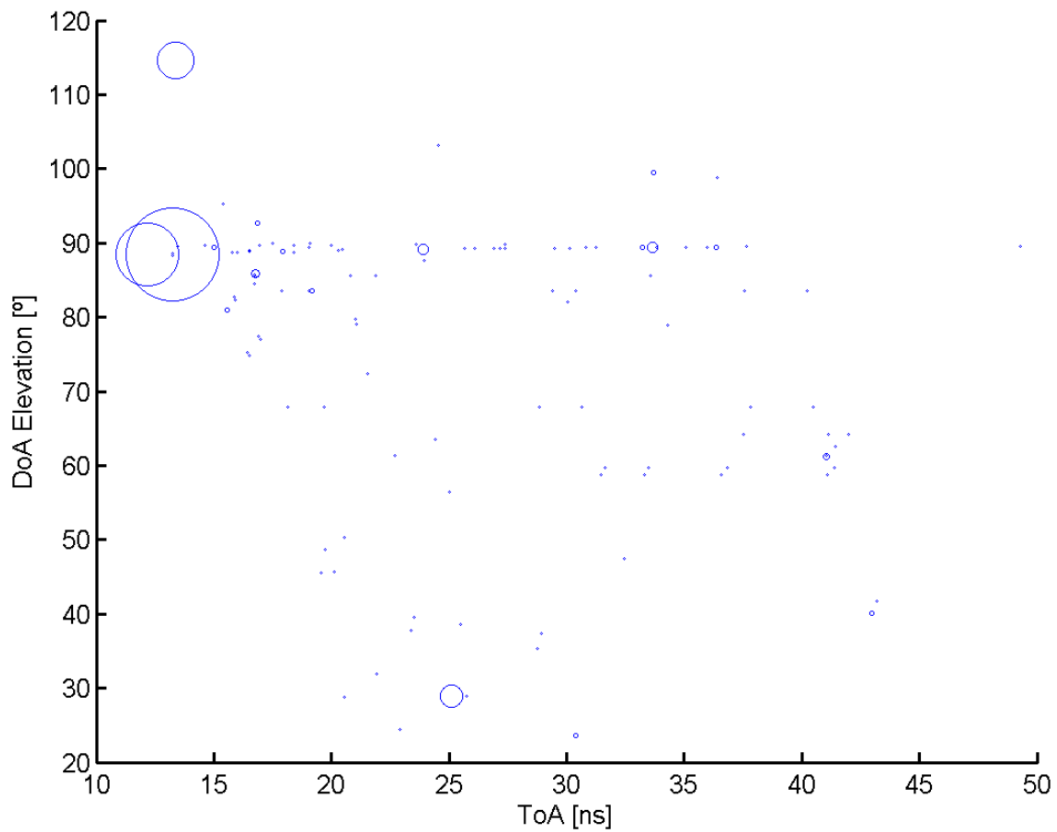
Gráfica 32. Direcciones de salida en azimuth para la posición 7.



Gráfica 33. Direcciones de salida en elevación para la posición 7.



Gráfica 34. Direcciones de llegada en azimuth para la posición 7.



Gráfica 35. Direcciones de llegada en elevación para la posición 7.

A modo de resumen para todas las posiciones, en la tabla 22 se muestran los resultados obtenidos mediante el simulador, lo que permitirá compararlos con los obtenidos a partir de las mediciones. Cabe destacar que se corresponden con el caso de simulación más completo.

Posición	Relative received power Pr (dB)		Delay spread DS (nanosegundos)		Maximum excess delay MED (nanosegundos)		Pérdidas (dB)	
	VV	HH	VV	HH	VV	HH	VV	HH
1	-94,51	-87,23	3,79	4,50	37,67	33,33	94,51	87,23
2	-92,07	-91,54	3,77	5,62	31,33	32,67	92,07	91,54
3	-87,22	-98,24	1,89	6,05	27,33	34,67	87,22	98,24
4	-89,11	-94,45	3,45	3,00	30,00	37,33	89,11	94,45
5	-92,31	-105,63	4,87	6,37	37,67	38,67	92,31	105,63
6	-91,77	-109,14	8,49	4,76	38,67	35,00	91,77	109,14
7	-86,21	-104,45	4,42	3,00	41,00	33,67	86,21	104,45
8	-91,53	-103,92	2,74	6,81	28,00	41,67	91,53	103,92
9	-92,53	-100,69	2,77	3,34	28,67	26,67	92,53	100,69
10	-87,84	-96,00	2,23	5,02	24,00	33,67	87,84	96,00
11	-85,11	-95,33	2,35	2,19	24,33	25,00	85,11	95,33
12	-81,13	-98,55	2,32	6,91	19,67	44,67	81,13	98,55
13	-86,07	-110,23	4,33	6,54	44,00	46,67	86,07	110,23
14	-89,21	-100,17	5,00	0,52	37,33	40,33	89,21	100,17
15	-82,19	-100,12	2,26	6,55	11,33	23,33	82,19	100,12
Media	-88,59	-99,71	3,65	4,75	30,73	35,16	88,59	99,71

Tabla 22. Parámetros obtenidos de las simulaciones a 94 GHz.

Una vez se han obtenido estos parámetros se puede comprobar la precisión de los mismos al ser comparados con la tabla que contiene los datos de las medidas. Para ello se ha elaborado una nueva tabla en la que se muestra para cada parámetro el porcentaje de error que se ha cometido a la hora de realizar las simulaciones. Cuanto más pequeño sea el valor, mejores serán los resultados.

Dicha tabla es la que se muestra a continuación.

Posición	Relative received power Pr (dB)		Delay spread DS (nanosegundos)		Maximum excess delay MED (nanosegundos)		Pérdidas (dB)	
	VV	HH	VV	HH	VV	HH	VV	HH
1	4,29%	2,96%	22,34%	35,14%	4,22%	13,04%	4,29%	2,96%
2	1,72%	1,78%	34,09%	10,41%	25,99%	21,58%	1,72%	1,78%
3	2,39%	10,45%	67,97%	22,47%	27,43%	7,13%	2,39%	10,45%
4	1,28%	5,74%	21,23%	56,90%	0,00%	0,89%	1,28%	5,74%
5	1,53%	12,03%	30,03%	16,51%	7,35%	7,18%	1,53%	12,03%
6	2,44%	18,04%	41,22%	29,00%	0,88%	3,98%	2,44%	18,04%
7	1,23%	14,36%	18,10%	48,01%	20,59%	19,83%	1,23%	14,36%
8	2,82%	11,66%	57,14%	26,06%	42,86%	8,07%	2,82%	11,66%
9	2,53%	8,54%	42,53%	66,53%	10,41%	39,39%	2,53%	8,54%
10	1,91%	11,40%	41,01%	67,33%	24,19%	24,70%	1,91%	11,40%
11	0,58%	13,40%	32,88%	20,07%	4,29%	4,17%	0,58%	13,40%
12	2,90%	10,38%	64,22%	60,70%	51,31%	42,58%	2,90%	10,38%
13	0,40%	19,88%	10,62%	63,50%	18,92%	45,84%	0,40%	19,88%
14	2,1%	19,59%	33,86%	44,68%	22,23%	92,05%	2,1%	19,59%
15	0,11%	13,48%	47,44%	44,88%	50,74%	20,46%	0,11%	13,48%
Media	1,88%	11,58%	37,65%	40,81%	20,76%	23,39%	1,88%	11,58%

Tabla 23. Precisión de las simulaciones respecto a las medidas para 94 GHz.

Cabe destacar que cuanto menor sea el valor del parámetro, una ligera variación entre el valor de medida y simulación hará que el porcentaje de error aumente mucho. Cuanto mayor sea el valor del parámetro este efecto disminuye. Más adelante se comparará la precisión de las simulaciones a 94 GHz con las de 60 GHz, para ver cuál de ellas ha obtenido mejores resultados.

5.2 Clustering de los resultados para la banda de 94 GHz.

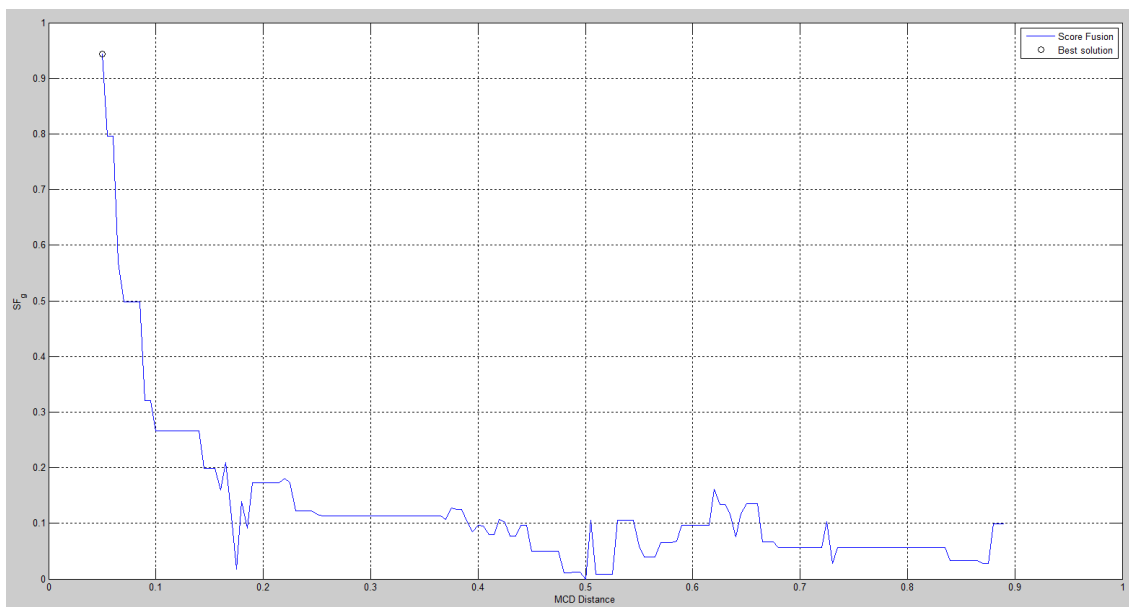
En este apartado se aplican a los parámetros del canal obtenidos los procedimientos de clustering tratados en apartados anteriores. Cabe destacar dos nuevos parámetros de interés:

- **Score fusion:** combinación de todos los índices de validación de clustering (CVI) para así aumentar su versatilidad. Dichos CVI valoran aspectos de los clusters como lo compactos que son, su separación interior y con otros clusters, etc. Cuando dicho valor cae de forma abrupta se produce el óptimo del MCD.

- **MCD:** También llamado multipath component distance, es un parámetro que calcula la distancia entre dos rayos teniendo en cuenta los ángulos y el retardo. Con ese parámetro podemos ejecutar el clustering, ya que usará como criterio que aquellos rayos que estén a una menor distancia son del mismo cluster, siempre y cuando su distancia no sea mayor a la óptima calculada anteriormente.

Resultados de clustering para la posición 1.

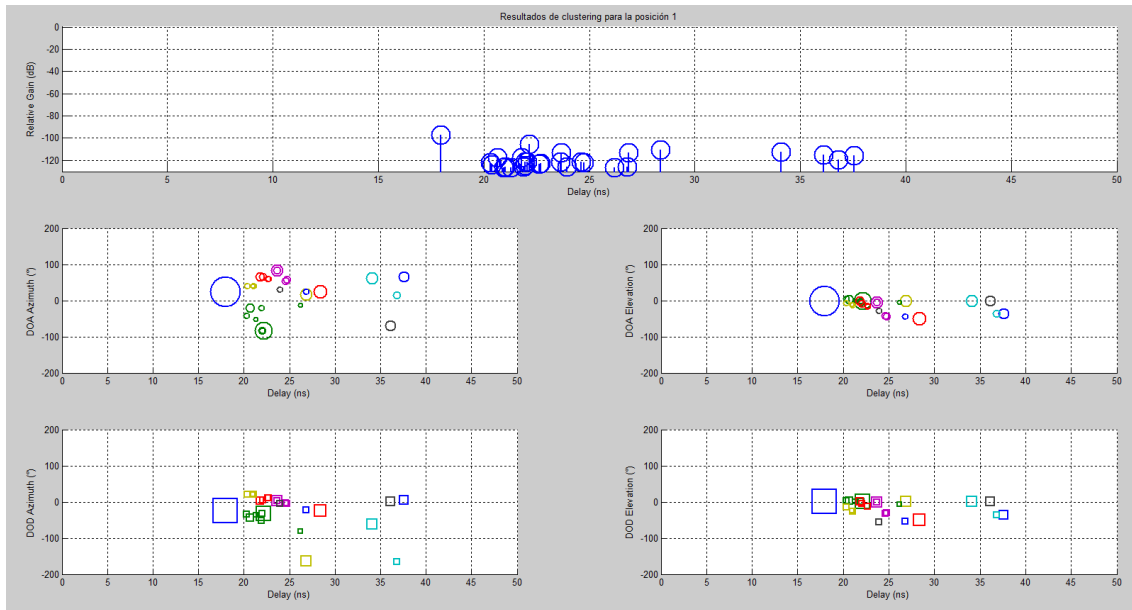
En la gráfica 36 se representa la función score fusión para la posición 1. De ella se obtiene el MCD óptimo con el que se aplicará el clustering.



Gráfica 36. Score fusion de la posición 1.

En la gráfica 37 se relaciona primero la potencia recibida de cada contribución con su retardo correspondiente y después el ángulo de llegada/salida de los rayos en los

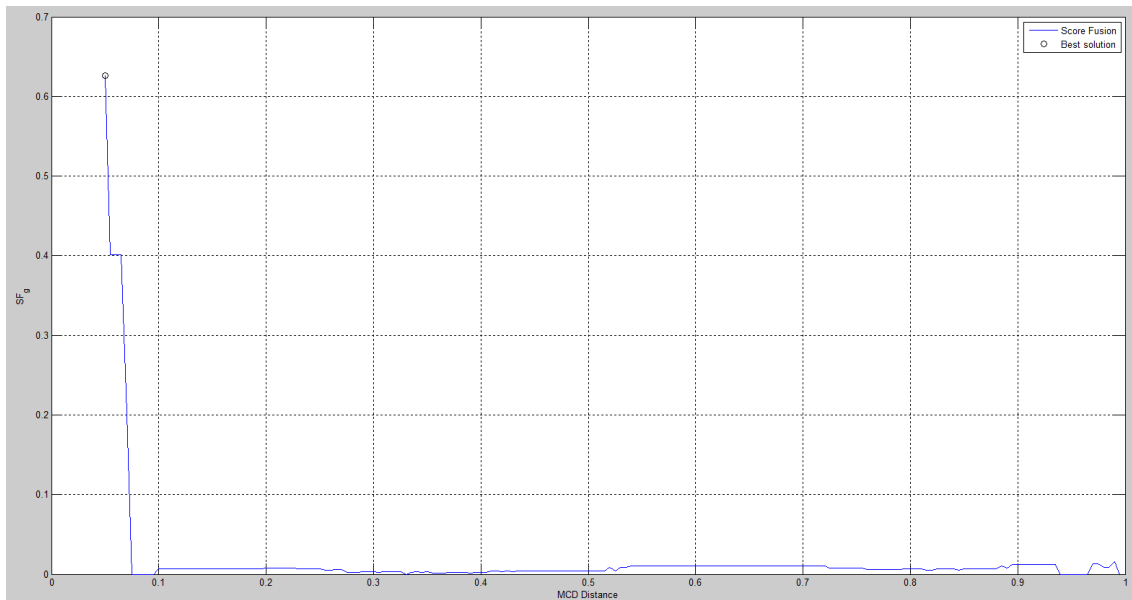
planos de azimut y elevación con el retardo en llegar. Cada color hace referencia a un cluster distinto.



Gráfica 37. Clusters de la posición 1.

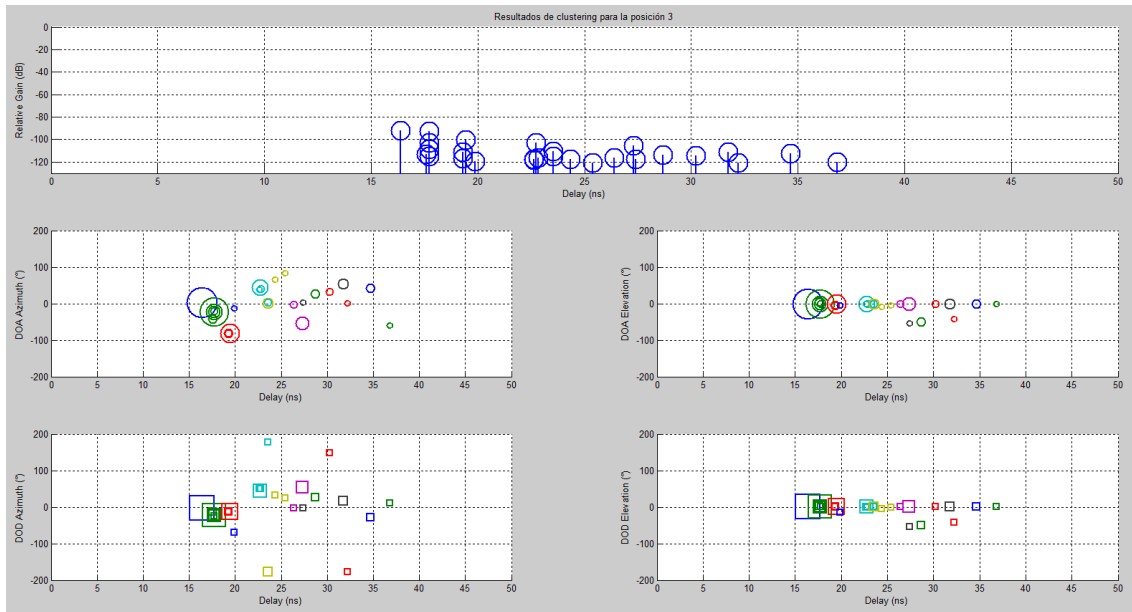
Resultados de clustering para la posición 3.

En la gráfica 38 se representa la función score fusión para la posición 3.



Gráfica 38. Score fusion de la posición 3.

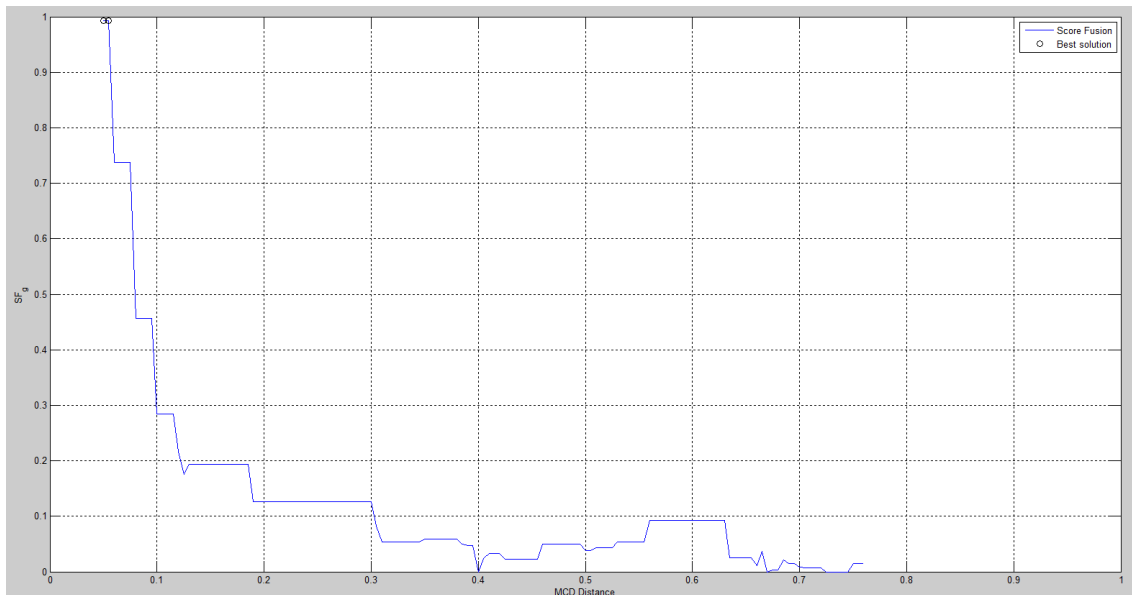
Los resultados de clustering de la posición 3 son los siguientes. Cada color hace referencia a un cluster distinto.



Gráfica 39. Clusters de la posición 3.

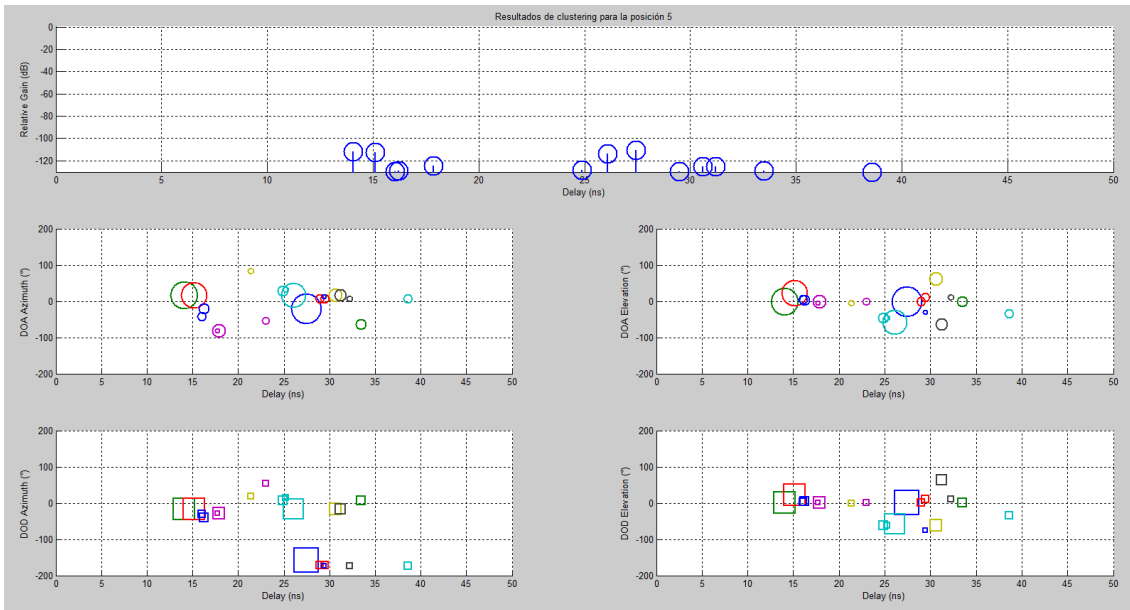
Resultados de clustering para la posición 5.

En la gráfica 40 se representa la función score fusión para la posición 5.



Gráfica 40. Score fusion de la posición 5.

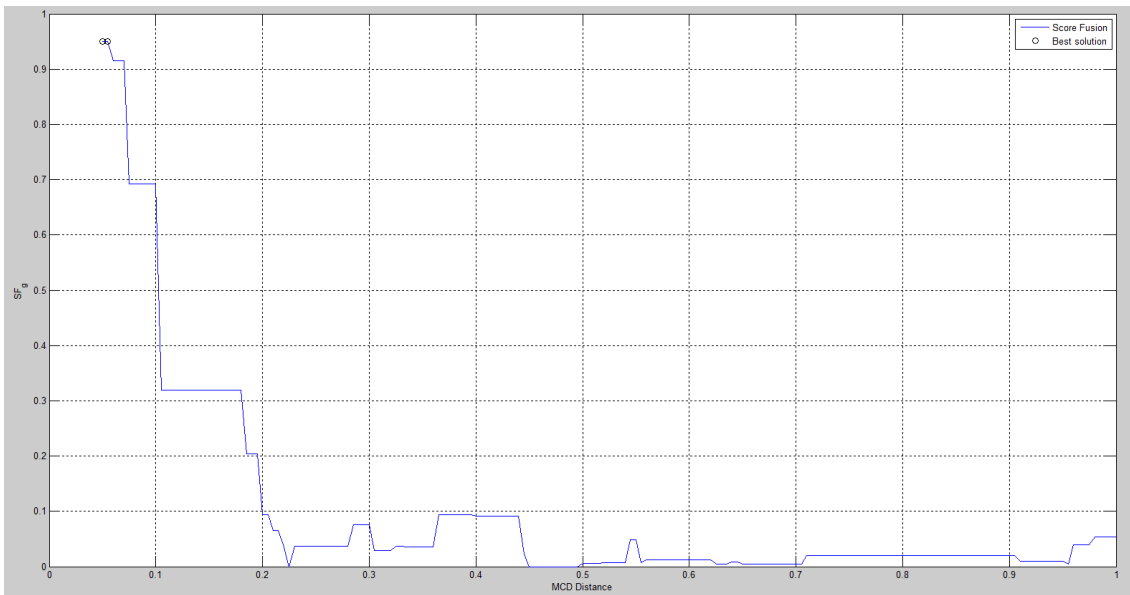
Los resultados de clustering de la posición 5 son los siguientes. Cada color hace referencia a un cluster distinto.



Gráfica 41. Clusters de la posición 5.

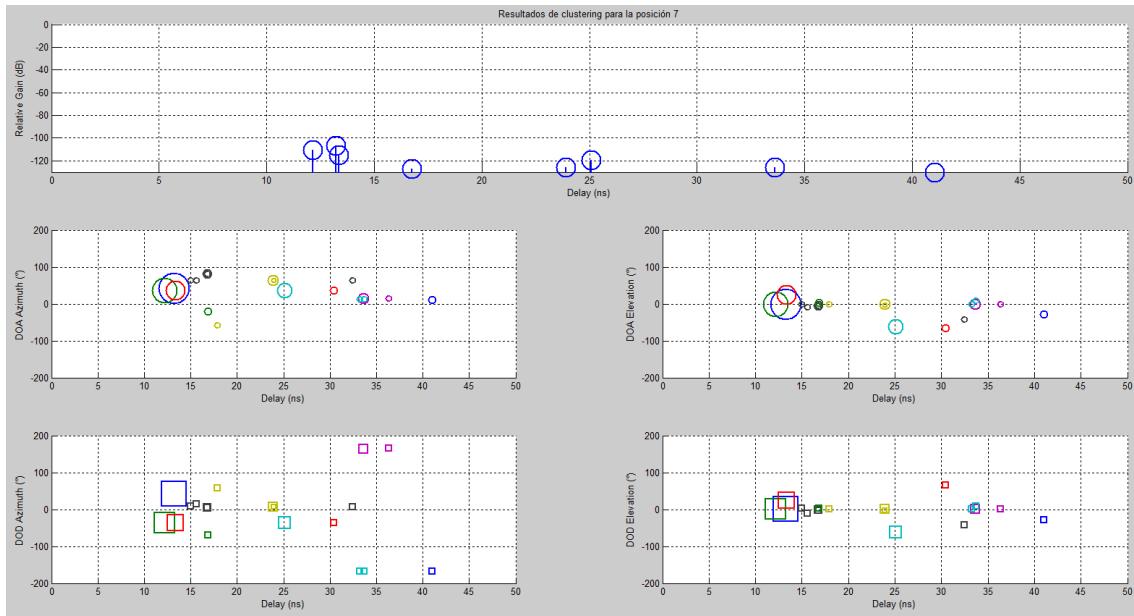
Resultados de clustering para la posición 7.

En la gráfica 42 se representa la función score fusión para la posición 7.



Gráfica 42. Score fusion de la posición 7.

Los resultados de clustering de la posición 7 son los siguientes. Cada color hace referencia a un cluster distinto.



Gráfica 43. Clusters de la posición 7.

A partir de las gráficas mostradas anteriormente y de los parámetros devueltos por el algoritmo de clustering podemos obtener todos los datos de interés para cada una de las posiciones de simulación para ambos casos de polarización copolar vertical y horizontal.

En la tabla 24 se muestra para el caso de polarización copolar vertical el número total de clusters que hay en cada posición de simulación, así como todos los rayos que los conforman.

Posición	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Núm. clusters	16	15	17	13	15	13	12	15	15	11	8	10	14	13	6
Rayos totales	28	27	27	22	26	22	21	25	27	20	13	16	20	17	7

Tabla 24. Número total de clusters y rayos de cada posición VV para 94 GHz.

En la tabla 25 se muestra para el caso de polarización copolar vertical, para cada uno de los clusters que hay en cada posición de simulación, el número de rayos que tiene cada uno.

Posición	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Cluster 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Cluster 2	3	3	5	3	3	1	1	5	5	5	5	4	4	4	2
Cluster 3	1	4	3	5	4	3	3	6	6	6	1	3	3	1	1
Cluster 4	1	1	4	1	1	2	5	1	1	1	1	1	2	1	1
Cluster 5	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Cluster 6	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Cluster 7	1	4	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-
Cluster 8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	2	-
Cluster 9	4	5	1	1	1	3	3	1	1	1	-	1	1	1	-
Cluster 10	4	1	1	1	3	1	1	1	3	1	-	1	1	1	-
Cluster 11	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	-	-	1	1	-
Cluster 12	2	1	1	1	1	5	1	2	2	-	-	-	1	1	-
Cluster 13	3	1	2	1	1	1	-	1	1	-	-	-	1	1	-
Cluster 14	1	1	1	-	5	-	-	1	1	-	-	-	1	-	-
Cluster 15	1	1	1	-	1	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-
Cluster 16	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cluster 17	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 25. Número de rayos en cada cluster VV para 94 GHz.

En la tabla 26 se muestra para el caso de polarización copolar horizontal el número total de clusters que hay en cada posición de simulación, así como todos los rayos que los conforman.

Posición	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Núm. clusters	4	9	12	8	15	20	14	17	9	12	9	10	20	13	7
Rayos totales	5	10	18	9	20	27	19	20	11	15	12	14	32	17	9

Tabla 26. Número total de clusters y rayos de cada posición HH para 94 GHz.

En la tabla 27 se muestra para el caso de polarización copolar vertical, para cada uno de los clusters que hay en cada posición de simulación, el número de rayos que tiene cada uno.

Posición	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Cluster 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	5	1	2
Cluster 2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	1	1	4	1
Cluster 3	1	1	5	2	1	3	1	1	1	2	1	1	1	1	1
Cluster 4	2	1	1	1	3	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2
Cluster 5	-	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	3	1	1	1
Cluster 6	-	1	1	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1
Cluster 7	-	1	2	1	1	1	4	1	1	1	1	1	3	1	1
Cluster 8	-	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	2	1	2	-
Cluster 9	-	1	1	-	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	-
Cluster 10	-	-	1	-	2	1	1	1	-	1	-	1	1	1	-
Cluster 11	-	-	2	-	1	1	2	2	-	1	-	-	2	1	-
Cluster 12	-	-	1	-	1	3	1	1	-	1	-	-	2	1	-
Cluster 13	-	-	-	-	1	1	1	1	-	-	-	-	2	1	-
Cluster 14	-	-	-	-	1	1	1	1	-	-	-	-	1	-	-
Cluster 15	-	-	-	-	1	1	-	1	-	-	-	-	1	-	-
Cluster 16	-	-	-	-	-	1	-	1	-	-	-	-	1	-	-
Cluster 17	-	-	-	-	-	1	-	1	-	-	-	-	1	-	-
Cluster 18	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	1	-	-
Cluster 19	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	3	-	-
Cluster 20	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	1	-	-

Tabla 27. Número de rayos en cada cluster HH para 94 GHz.

5.3 Resultados para la banda de 60 GHz.

Al igual que para el caso de 94 GHz, los primeros parámetros obtenidos para la banda de 60 GHz son la potencia relativa recibida, el RMS delay spread, el maximum excess delay y las pérdidas, todos ellos correspondientes a las medidas realizadas. Además de que para este caso las posiciones de medida han sido 17 en vez de 15, solamente se han realizado para el caso de polarización copolar vertical. En la tabla 28 se recopilan todos estos parámetros de caracterización del canal para el mismo umbral de 20 dB usado anteriormente.

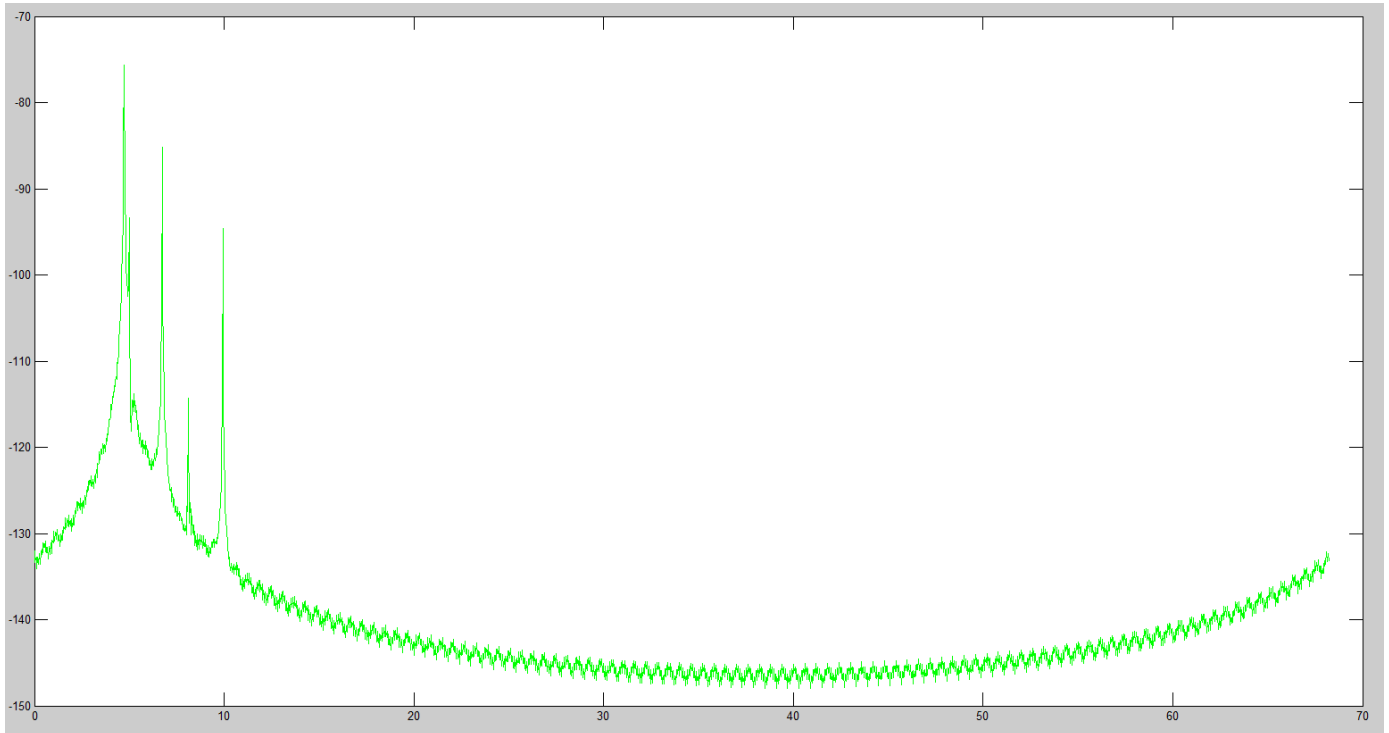
Posición	Relative received power Pr (dB)	Delay spread DS (nanosegundos)	Maximum excess delay MED (nanosegundos)	Pérdidas (dB)
1	-72,92	1,96	32,00	72,92
2	-80,96	67,37	227,44	80,96
3	-70,79	3,03	29,44	70,79
4	-70,94	3,12	28,22	70,94
5	-69,92	1,89	23,67	69,92
6	-70,24	2,08	25,56	70,24
7	-70,48	2,08	25,56	70,48
8	-70,62	3,69	31,78	70,62
9	-71,29	2,53	26,56	71,29
10	-71,66	2,56	26,56	71,66
11	-72,06	2,67	27,89	72,06
12	-72,29	2,65	27,89	72,29
13	-71,42	3,38	29,78	71,42
14	-72,99	2,85	30,44	72,99
15	-73,33	2,95	30,33	73,33
16	-71,47	4,69	44,22	71,47
17	-71,56	3,97	31,78	71,56
Media	-72,06	6,67	41,12	72,06

Tabla 28. Parámetros obtenidos de las medidas a 60 GHz.

Una vez obtenidos los parámetros de las medidas, se procede a analizar los datos proporcionados por el trazador de rayos más profundamente.

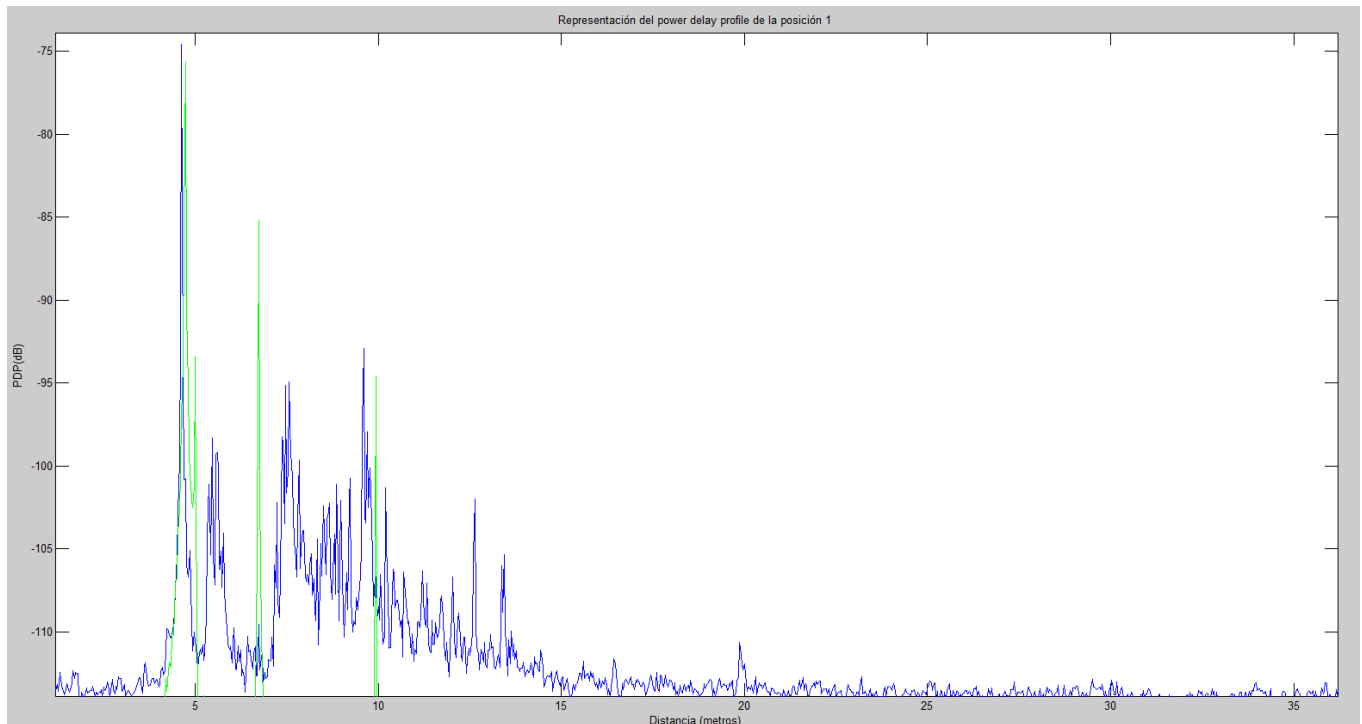
El primer elemento a analizar será el power delay profile, al ser la función de la que se sacan todos los otros que permiten caracterizar el canal de propagación. Al igual que para el caso de 94 GHz, para el de 60 GHz se partirá de un caso de simulación sencillo y de poco coste computacional y temporal, se comparará con el PDP de las medidas y progresivamente se irán añadiendo mecanismos de propagación para observar cómo va evolucionando, hasta así llegar a un caso de simulación más complejo pero de mayor coste computacional y temporal.

El primero que se muestra en la gráfica 44 es el que se corresponde para el caso de simulación que contempla una sola reflexión como mecanismo de propagación.



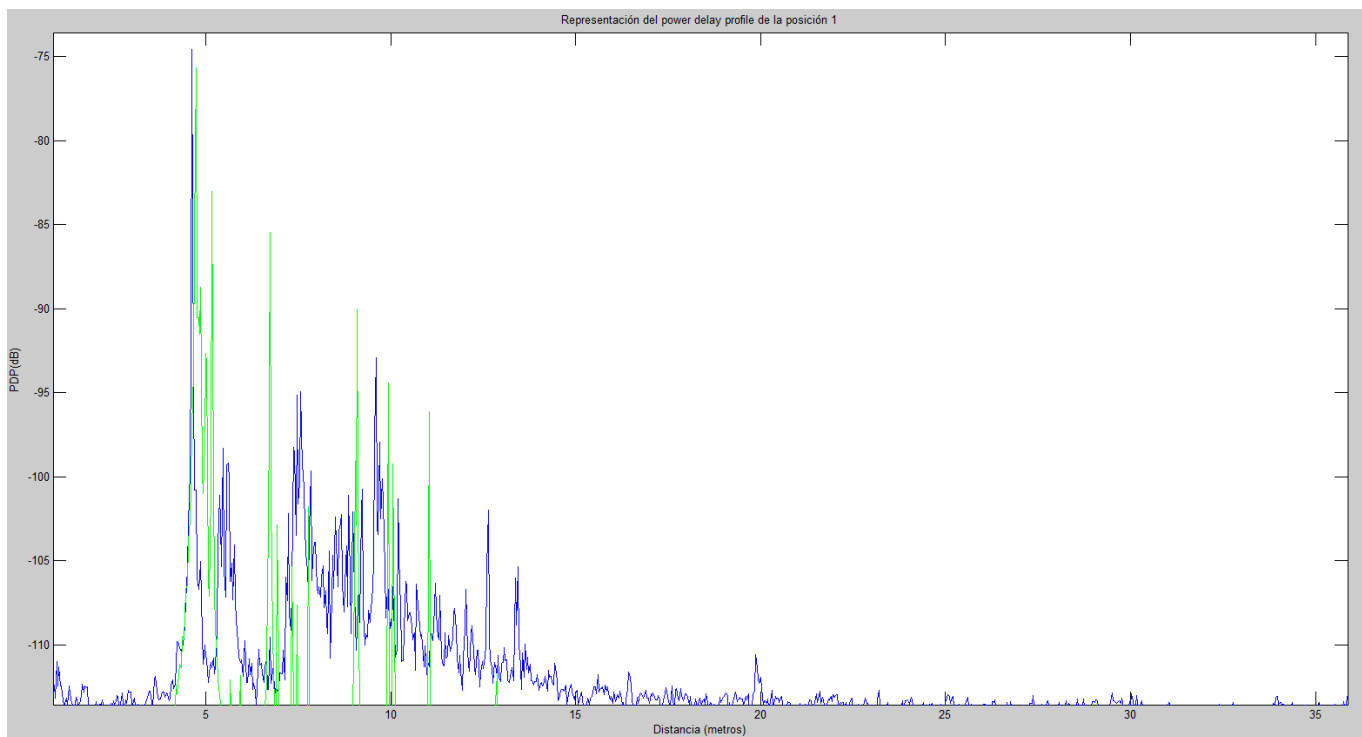
Gráfica 44. Simulación con una sola reflexión (II).

Como en el caso a 94 GHz, al compararse con el obtenido mediante las mediciones (en azul) en la gráfica 45 se puede observar que la contribución directa es muy acertada tanto en la distancia recorrida así como en potencia recibida. Sin embargo, el resto del PDP difiere bastante entre ambos debido de nuevo al poco 'realismo' de la simulación. Se solucionará añadiendo más mecanismos de propagación a la simulación.



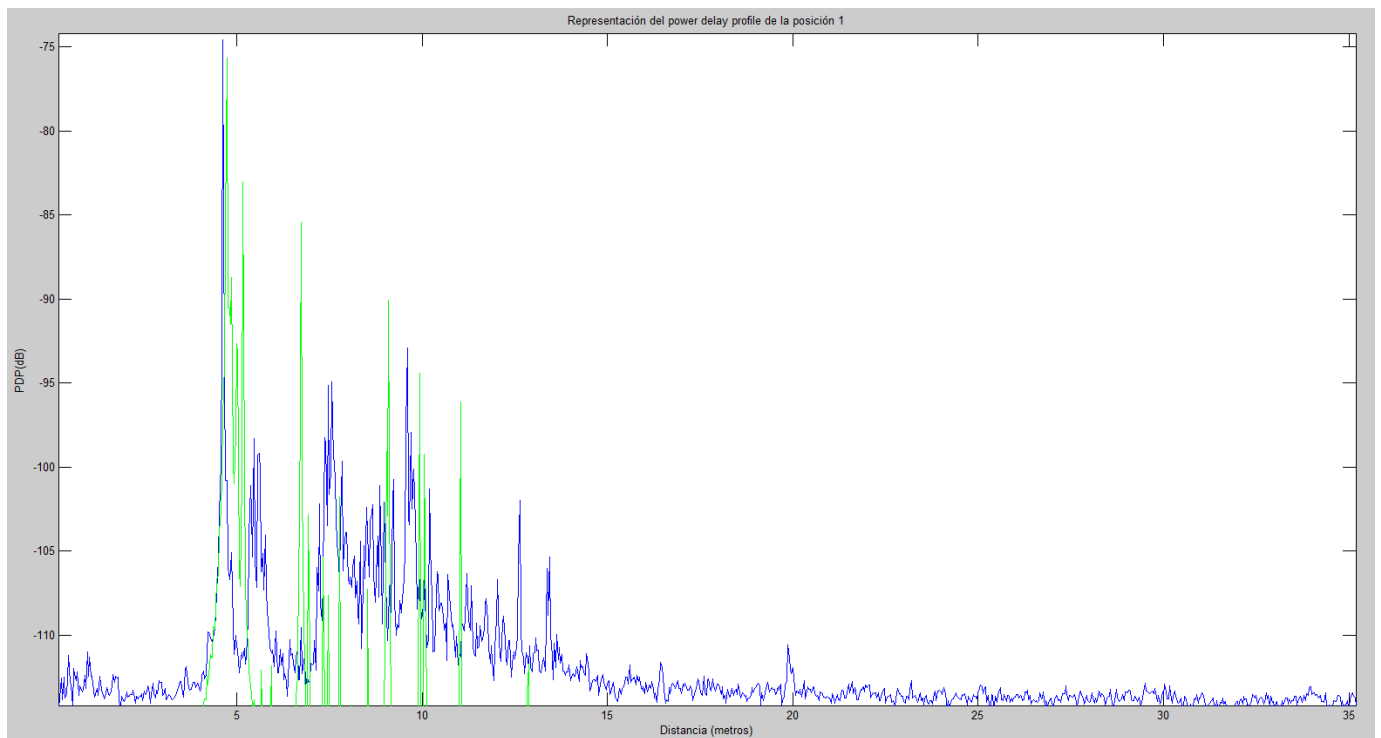
Gráfica 45. Comparación entre PDP simulado y medido (IV).

En la gráfica 46 se muestra la comparación entre el PDP real y simulado para el caso de rayos que sufren una y dos reflexiones, así como aquellos que sufren un fenómeno de difracción.



Gráfica 46. Comparación entre PDP simulado y medido (V).

Los resultados de simulación mejoran. Se pueden apreciar, al igual que ocurrió para el caso de 94 GHz, algunas componentes secundarias con gran potencia debido seguramente a la reflexión en alguna superficie metálica. De todas formas todavía se pueden mejorar aún más los resultados. En la gráfica 47 se muestra el caso más complejo de todos, en el cual, aparte de los mecanismos de propagación mencionados anteriormente, se incluye también el que contempla los rayos que han sido primero reflejados y luego difractados, así como viceversa.



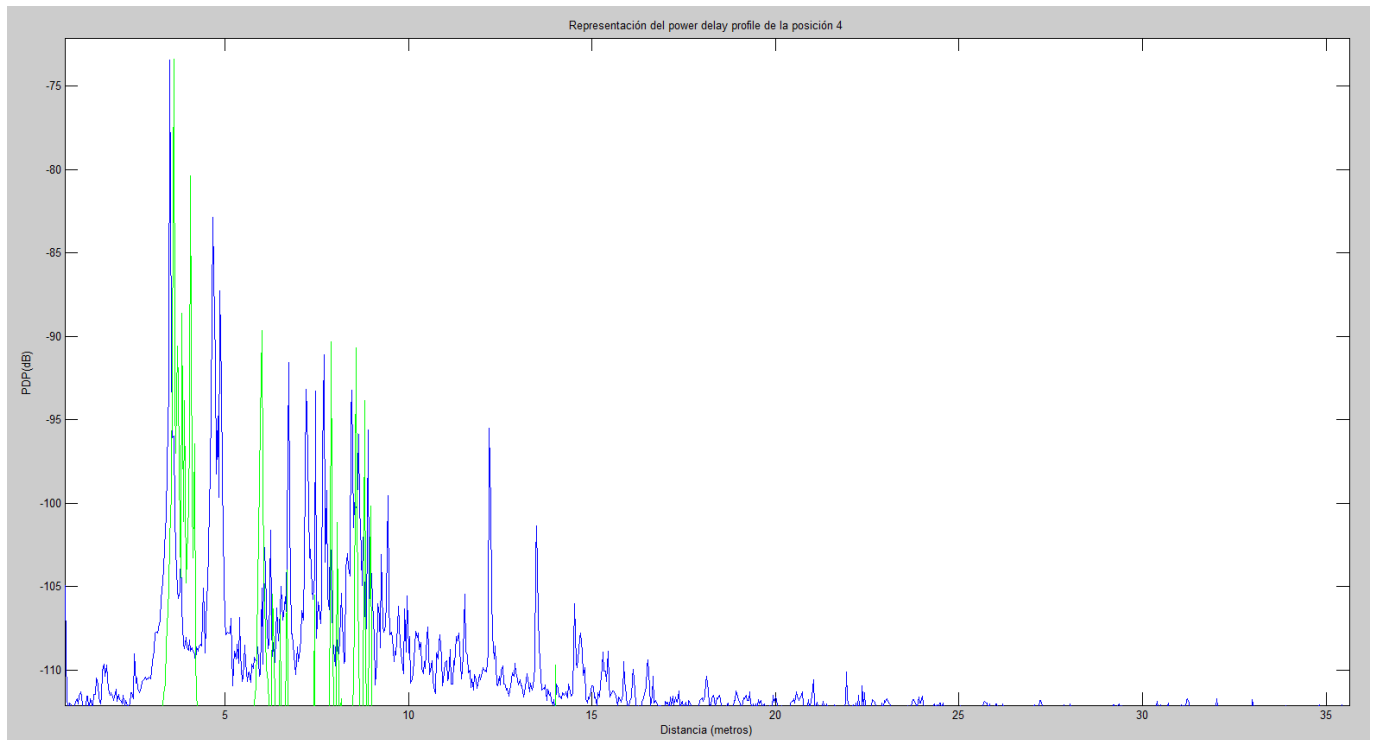
Gráfica 47. Comparación entre PDP simulado y medido (VI).

Este es el caso de simulación más preciso y que mejor resultados arroja, por lo que será para el que se obtendrán los distintos parámetros de caracterización del canal simulado, así como los otros aspectos de interés mencionados en el apartado de metodología de análisis que se podían obtener a partir de la realización de las simulaciones.

Por la misma razón que para los resultados obtenidos en la banda de 94 GHz, en la presente memoria sólo se pondrán parte de los casos de simulación con el objetivo de evitar que quede demasiado extensa. Se analizarán un total de cuatro posiciones, todas ellas con polarización copolar vertical al haber sido el único caso de polarización de las medidas.

Posición 4 con polarización copolar vertical.

El power delay profile obtenido para esta posición es el siguiente. Se muestra a su vez el correspondiente a las medidas para esa misma posición.



Gráfica 48. Power delay profile de la posición 4.

Los parámetros de caracterización del canal obtenidos para la posición 4 han sido los que se muestran en la tabla 29.

Parámetros simulados para la posición 4	
Valor del delay spread (nseg)	2,64
Valor de las pérdidas (dB)	71,33
Valor de la potencia relativa recibida (dB)	-71,33
Valor del máximo excess delay (nseg)	28,56

Tabla 29. Parámetros del canal de la posición 4.

Los valores obtenidos de dispersión angular y valor medio de los ángulos de la posición 4 son los mostrados en las tablas 30 y 31.

Dispersión angular para la posición 4 (grados)	
Dispersión angular de salida en azimut	22,84
Dispersión angular de salida en elevación	1,13
Dispersión angular de llegada en azimut	36,22
Dispersión angular de llegada en elevación	2,13

Tabla 30. Dispersión angular para la posición 4.

Valor medio de los ángulos para la posición 4 (grados)	
Valor medio de salida en azimut	-17,94
Valor medio de salida en elevación	91,70
Valor medio de llegada en azimut	5,66
Valor medio de llegada en elevación	88,89

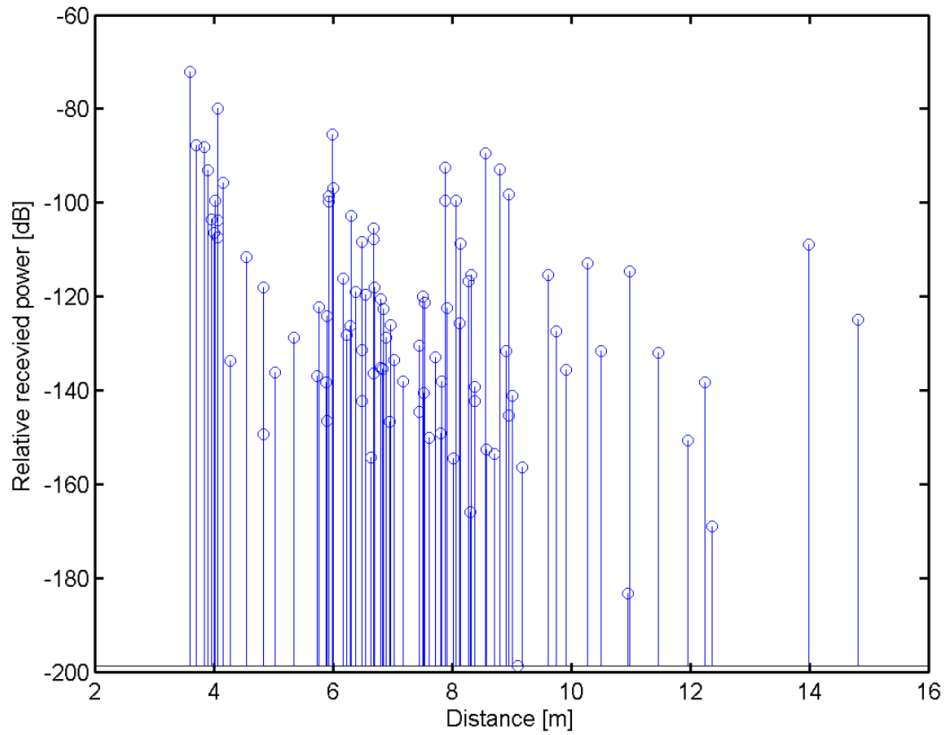
Tabla 31. Valor medio de los ángulos para la posición 4.

Otro parámetro de interés a tener en cuenta es el ángulo de salida del transmisor y el de llegada al receptor del rayo directo, al ser la contribución más energética. Sus valores para el caso de la posición 4 son los que se muestran en la tabla 32.

Posición	DoD	DoA
4	-17,72	17,72

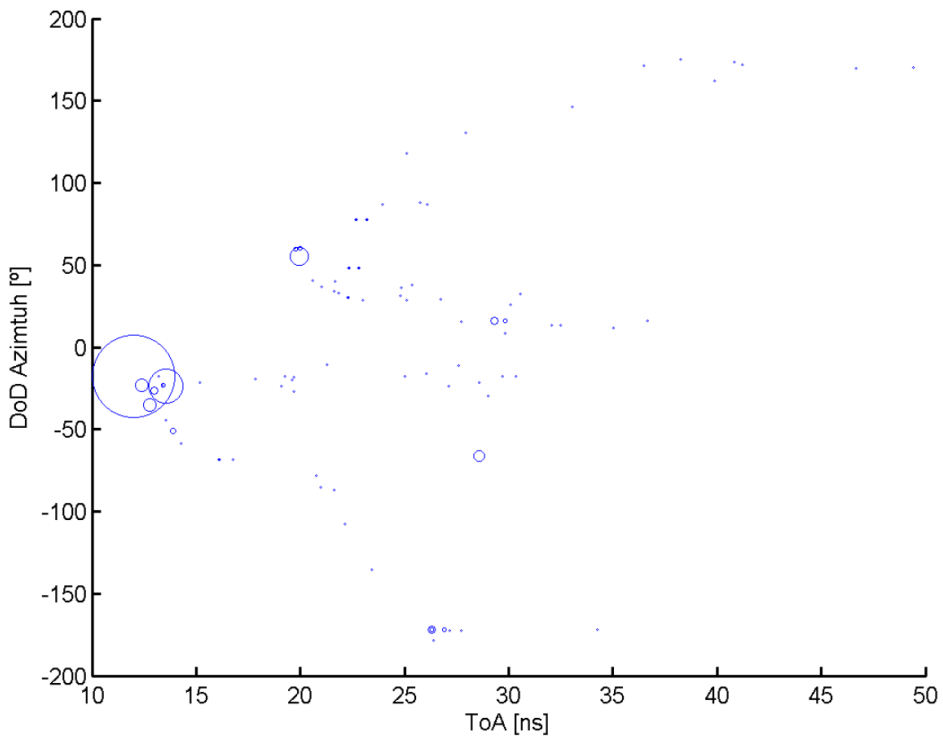
Tabla 32. Valor de los ángulos de llegada y salida de la posición 4.

Los valores obtenidos para la gráfica del CIR de la posición 4 son los siguientes.

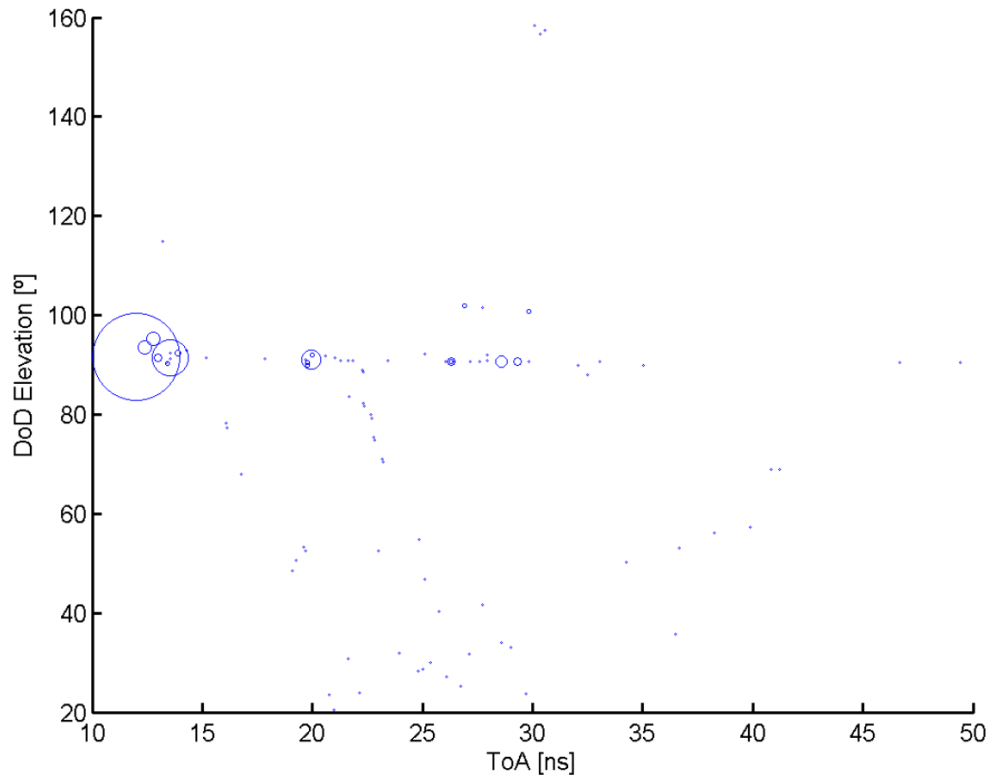


Gráfica 49. Gráfica del CIR para la posición 4.

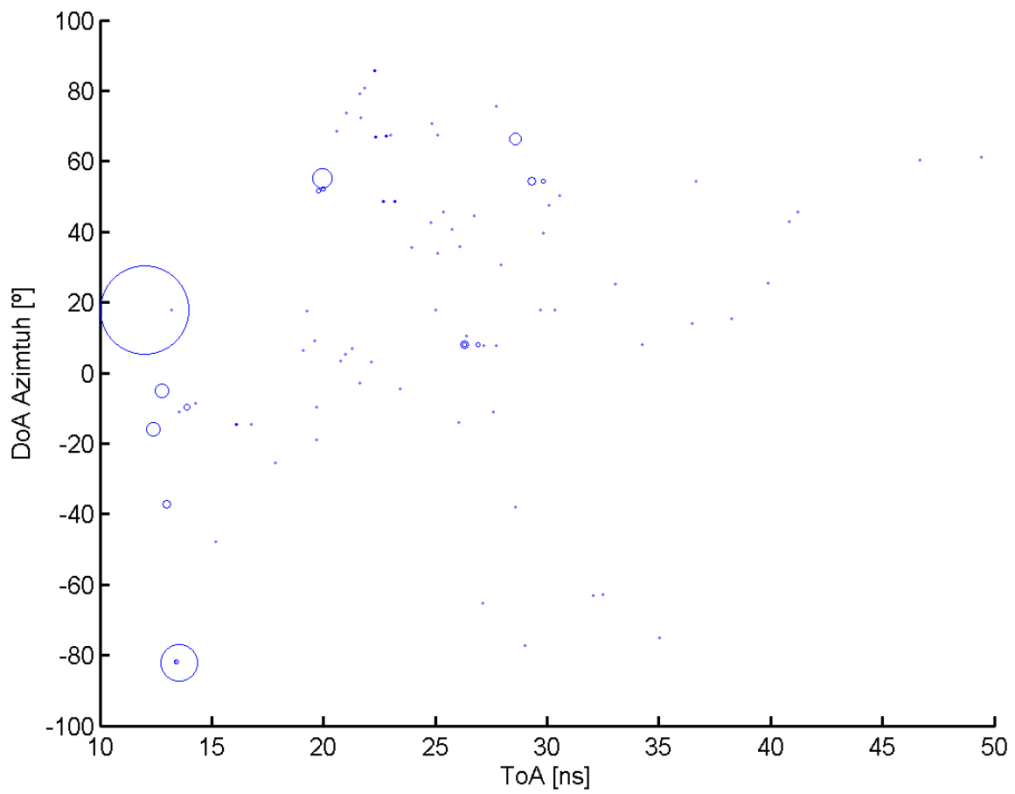
Las gráficas que relacionan el ángulo, la energía y el tiempo de llegada de las distintas contribuciones se muestran a continuación. Están para el caso de DoD y DoA en ambos planos de azimut y elevación.



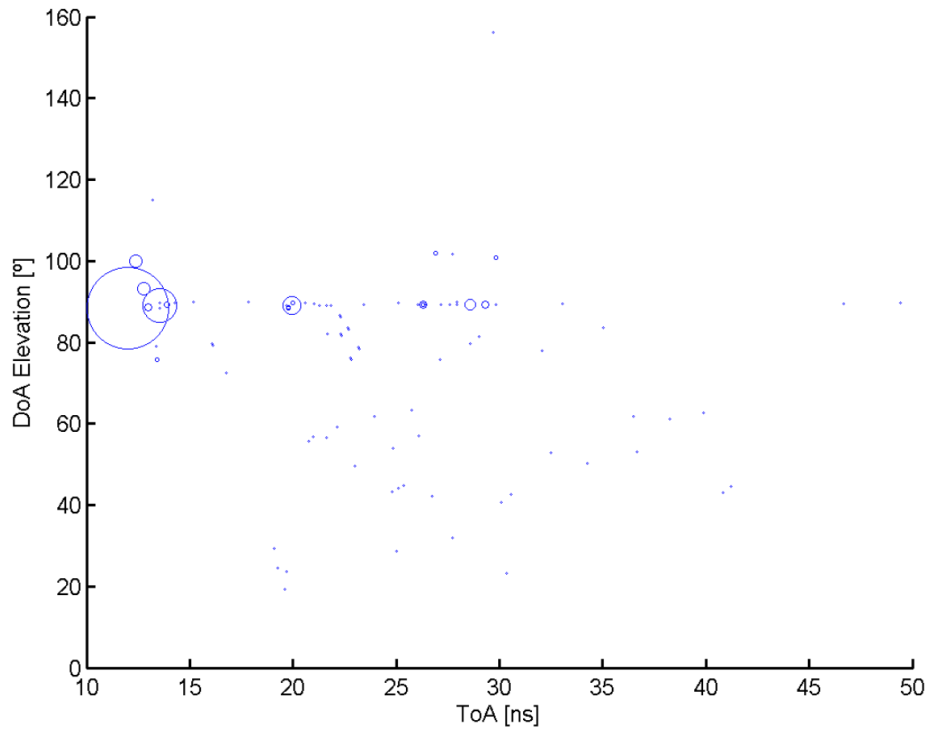
Gráfica 50. Direcciones de salida en azimut para la posición 4.



Gráfica 51. Direcciones de salida en elevación para la posición 4.



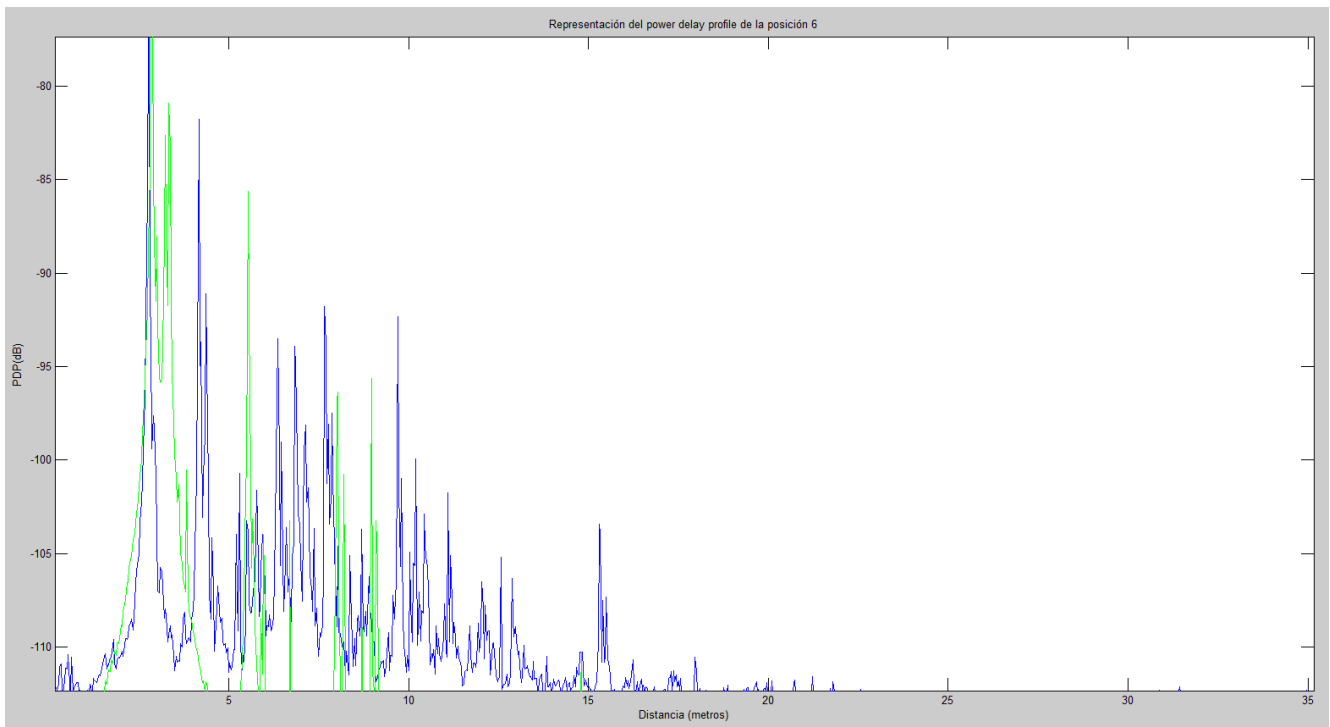
Gráfica 52. Direcciones de llegada en azimuth para la posición 4.



Gráfica 53. Direcciones de llegada en elevación para la posición 4.

Posición 6 con polarización copolar vertical.

El power delay profile obtenido para esta posición es el siguiente. Se muestra a su vez el correspondiente a las medidas para esa misma posición.



Gráfica 54. Power delay profile de la posición 6.

Los parámetros de caracterización del canal obtenidos para la posición 6 han sido los que se muestran en la tabla 33.

Parámetros simulados para la posición 6	
Valor del delay spread (nseg)	1,59
Valor de las pérdidas (dB)	69,26
Valor de la potencia relativa recibida (dB)	-69,26
Valor del máximo excess delay (nseg)	18,56

Tabla 33. Parámetros del canal de la posición 6.

Los valores obtenidos de dispersión angular y valor medio de los ángulos de la posición 6 son los mostrados en las tablas 34 y 35.

Dispersión angular para la posición 6 (grados)	
Dispersión angular de salida en azimuth	17,86
Dispersión angular de salida en elevación	0,95
Dispersión angular de llegada en azimuth	37,90
Dispersión angular de llegada en elevación	1,71

Tabla 34. Dispersión angular para la posición 6.

Valor medio de los ángulos para la posición 6 (grados)	
Valor medio de salida en azimuth	-23,54
Valor medio de salida en elevación	92,08
Valor medio de llegada en azimuth	5,92
Valor medio de llegada en elevación	88,39

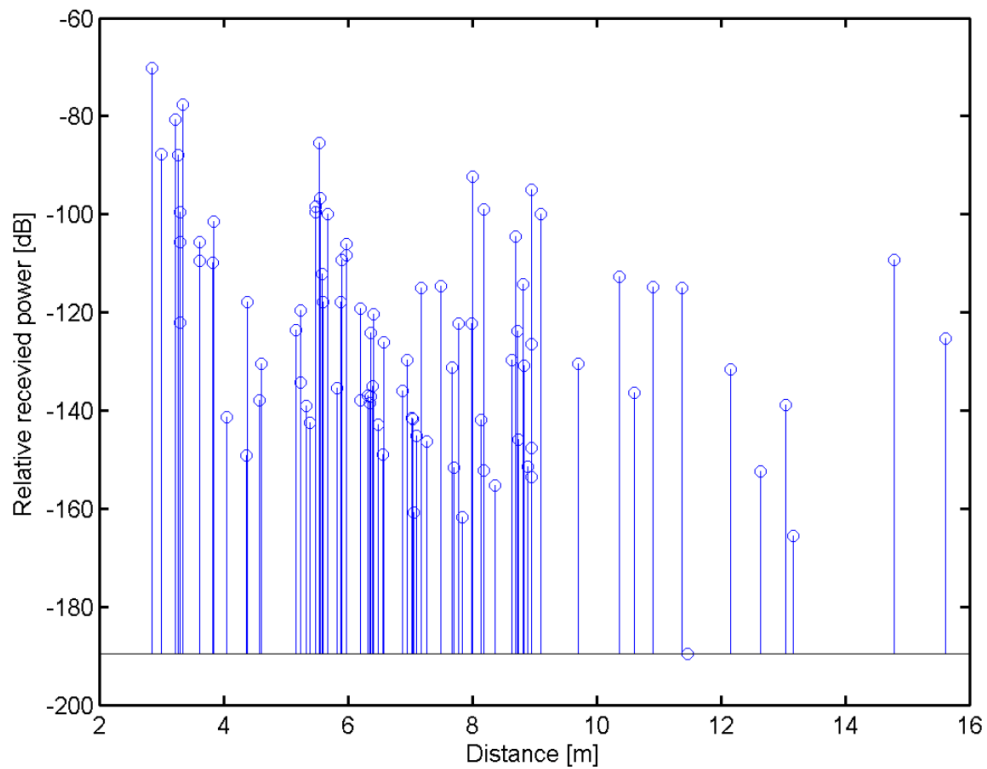
Tabla 35. Valor medio de los ángulos para la posición 6.

Otro parámetro de interés a tener en cuenta es el ángulo de salida del transmisor y el de llegada al receptor del rayo directo, al ser la contribución más energética. Sus valores para el caso de la posición 6 son los que se muestran en la tabla 36.

Posición	DoD	DoA
6	-23,31	23,31

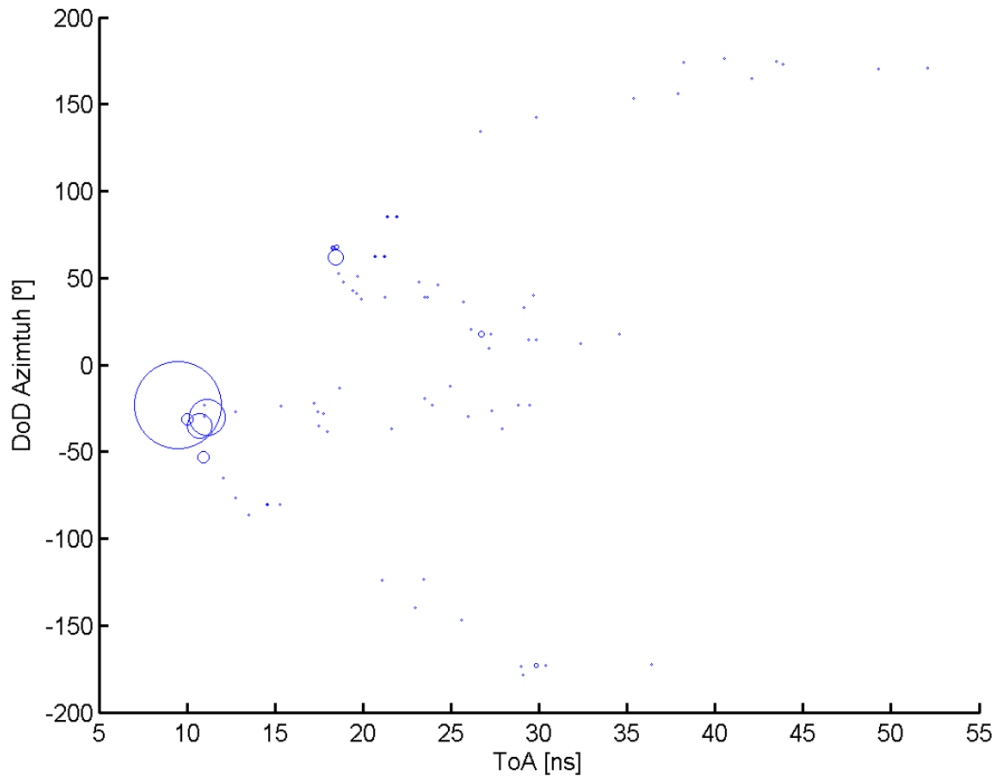
Tabla 36. Valor de los ángulos de llegada y salida de la posición 6.

Los valores obtenidos para la gráfica del CIR de la posición 6 son los siguientes.

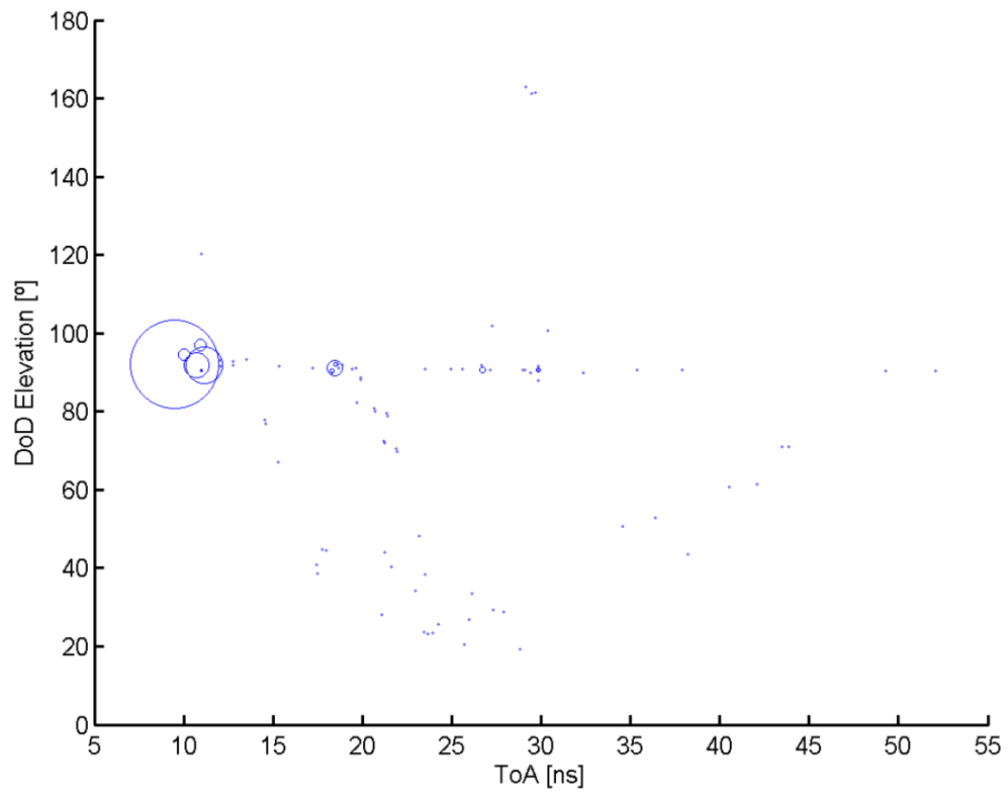


Gráfica 55. Gráfica del CIR para la posición 6.

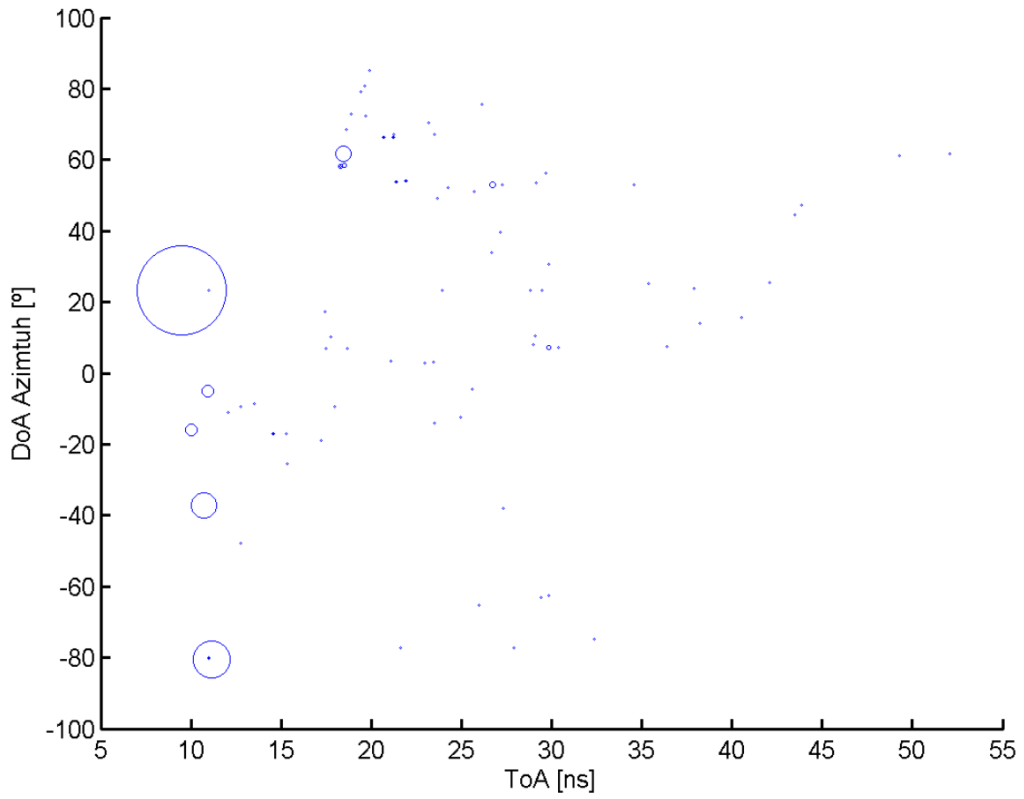
Las gráficas que relacionan el ángulo, la energía y el tiempo de llegada de las distintas contribuciones se muestran a continuación. Están para el caso de DoD y DoA en ambos planos de azimut y elevación.



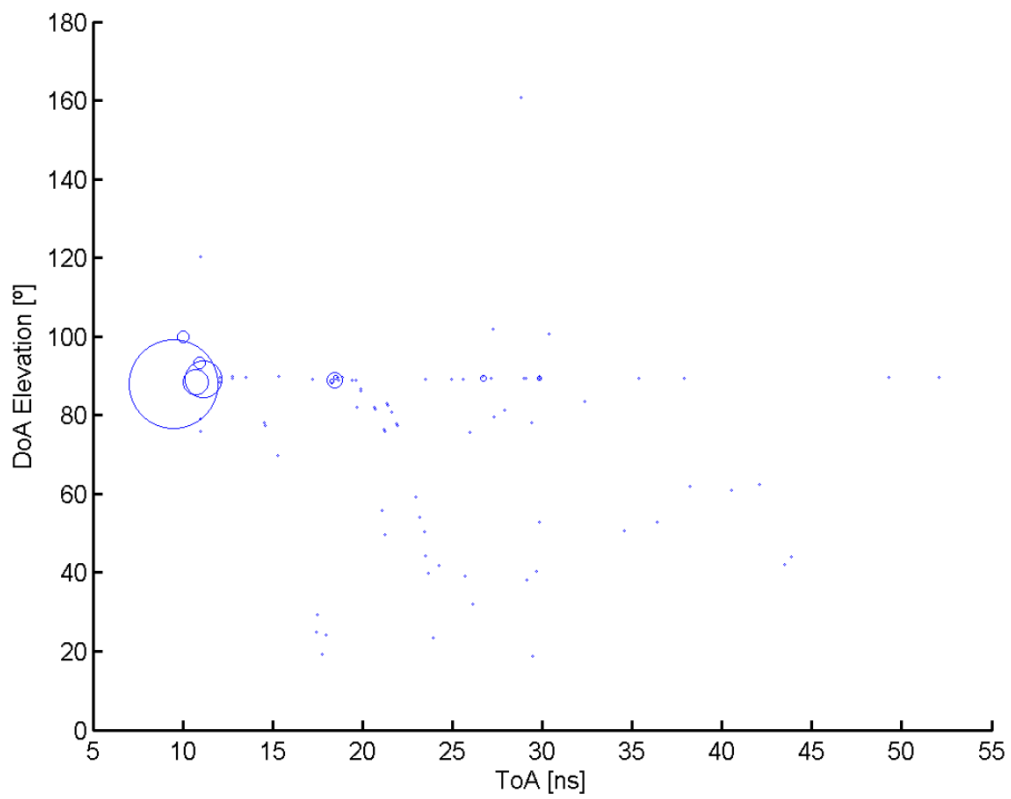
Gráfica 56. Direcciones de salida en azimuth para la posición 6.



Gráfica 57. Direcciones de salida en elevación para la posición 6.



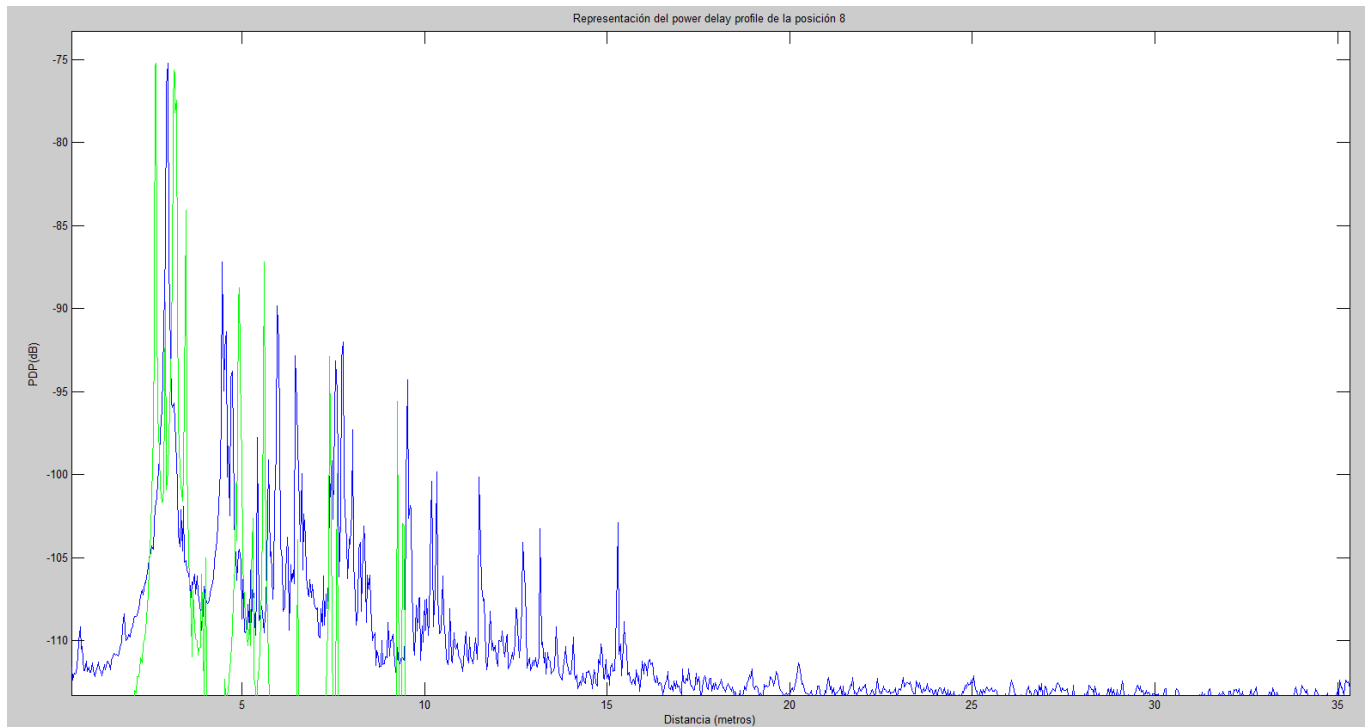
Gráfica 58. Direcciones de llegada en azimuth para la posición 6.



Gráfica 59. Direcciones de llegada en elevación para la posición 6.

Posición 8 con polarización copolar vertical.

El power delay profile obtenido para esta posición es el siguiente. Se muestra a su vez el correspondiente a las medidas para esa misma posición.



Gráfica 60. Power delay profile de la posición 8.

Los parámetros de caracterización del canal obtenidos para la posición 8 han sido los que se muestran en la tabla 37.

Parámetros simulados para la posición 8	
Valor del delay spread (nseg)	1,45
Valor de las pérdidas (dB)	66,88
Valor de la potencia relativa recibida (dB)	-66,88
Valor del máximo excess delay (nseg)	18,67

Tabla 37. Parámetros del canal de la posición 8.

Los valores obtenidos de dispersión angular y valor medio de los ángulos de la posición 8 son los mostrados en las tablas 38 y 39.

Dispersión angular para la posición 8 (grados)	
Dispersión angular de salida en azimut	21,27
Dispersión angular de salida en elevación	0,87
Dispersión angular de llegada en azimut	46,03
Dispersión angular de llegada en elevación	1,38

Tabla 38. Dispersión angular para la posición 8.

Valor medio de los ángulos para la posición 8 (grados)	
Valor medio de salida en azimut	-38,97
Valor medio de salida en elevación	92,14
Valor medio de llegada en azimut	-4,27
Valor medio de llegada en elevación	88,25

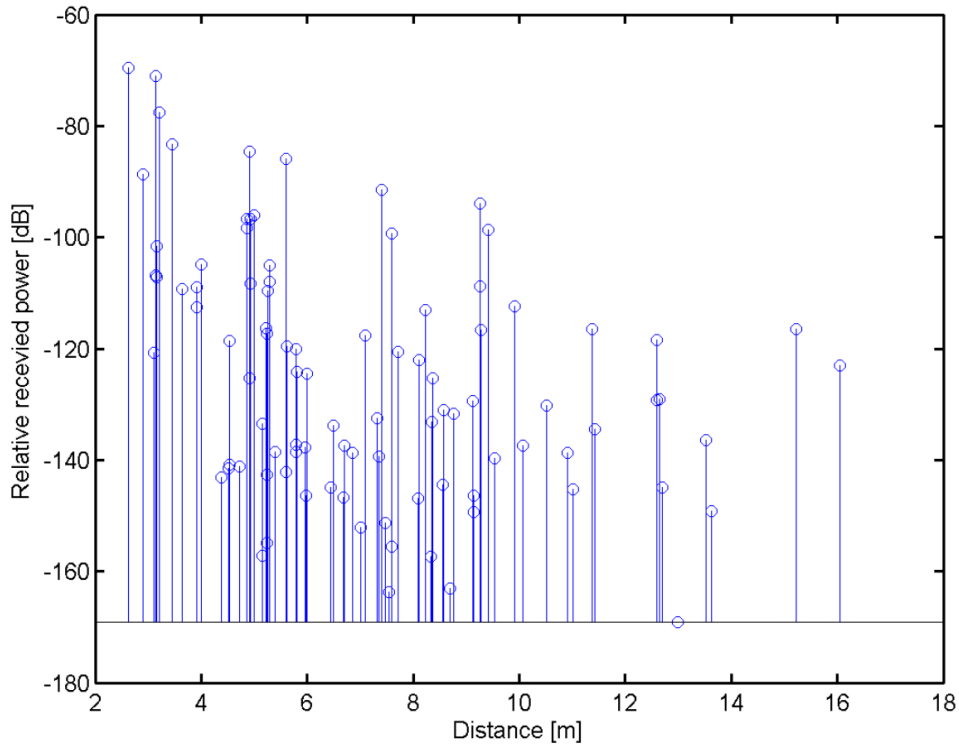
Tabla 39. Valor medio de los ángulos para la posición 8.

Otro parámetro de interés a tener en cuenta es el ángulo de salida del transmisor y el de llegada al receptor del rayo directo, al ser la contribución más energética. Sus valores para el caso de la posición 8 son los que se muestran en la tabla 40.

Posición	DoD	DoA
8	-36,62	36,62

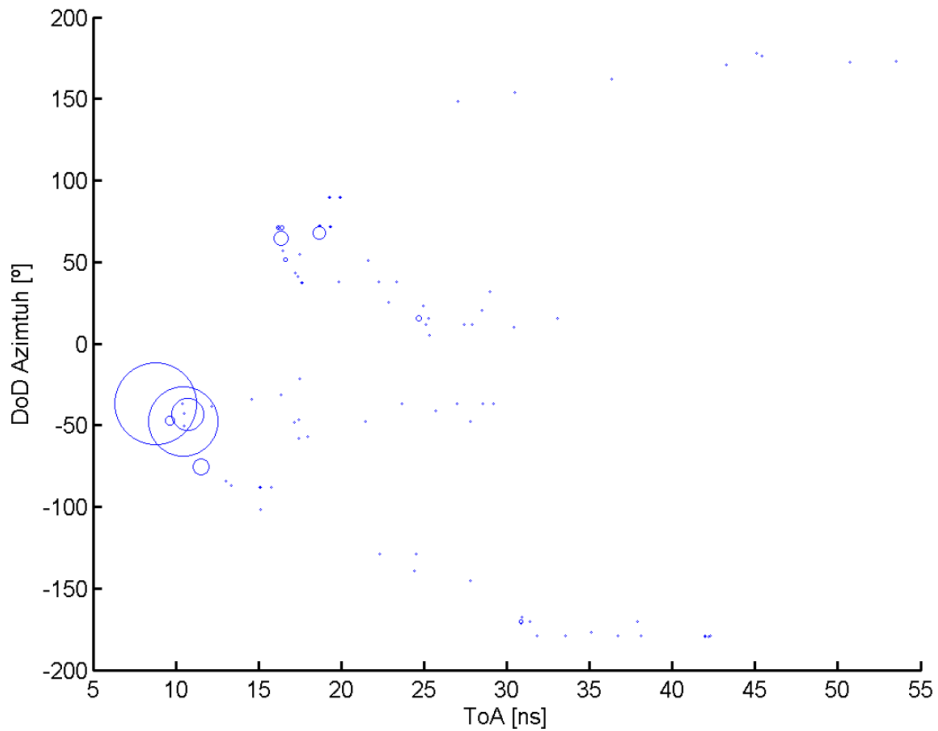
Tabla 40. Valor de los ángulos de llegada y salida de la posición 8.

Los valores obtenidos para la gráfica del CIR de la posición 8 son los siguientes.

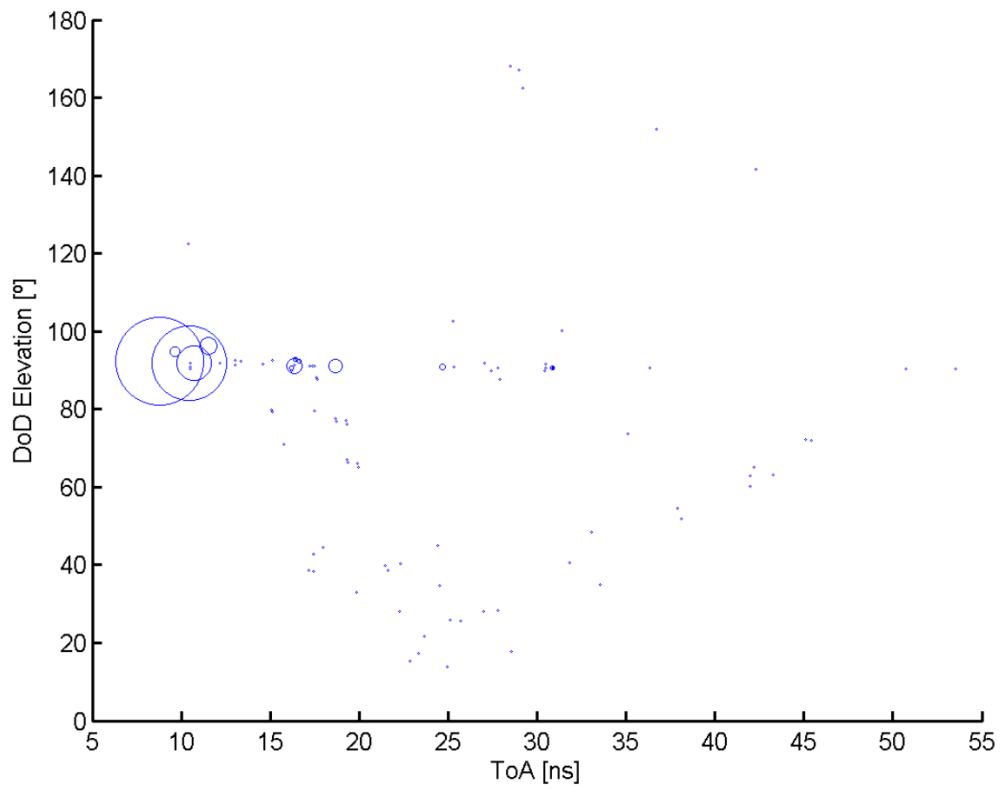


Gráfica 61. Gráfica del CIR para la posición 8.

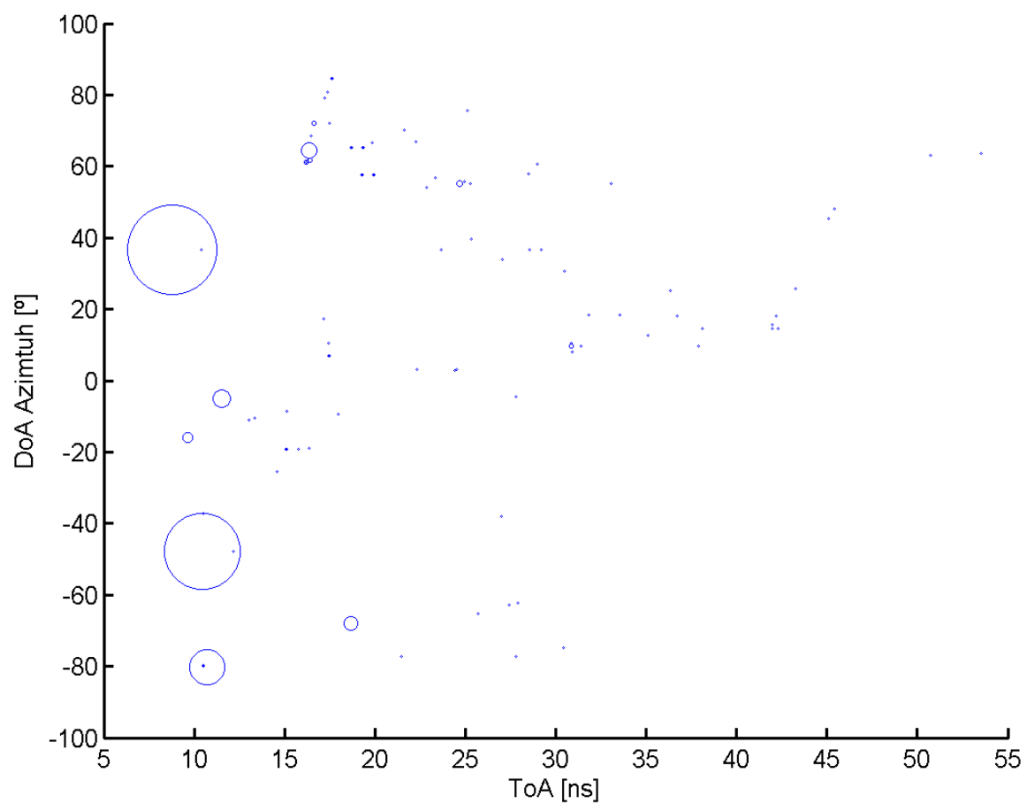
Las gráficas que relacionan el ángulo, la energía y el tiempo de llegada de las distintas contribuciones se muestran a continuación. Están para el caso de DoD y DoA en ambos planos de azimut y elevación.



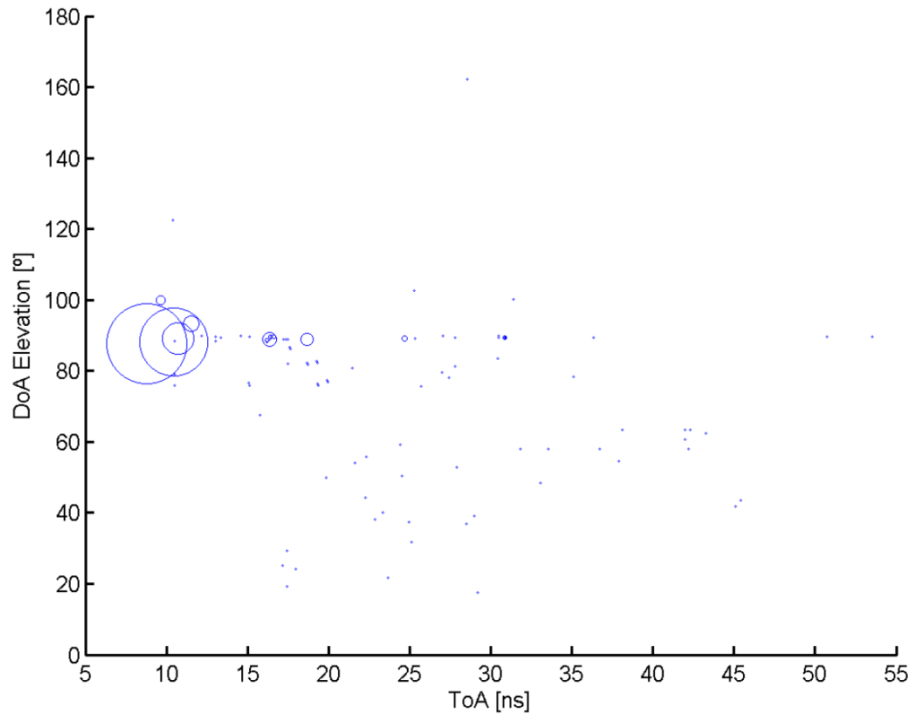
Gráfica 62. Direcciones de salida en azimut para la posición 8.



Gráfica 63. Direcciones de salida en elevación para la posición 8.



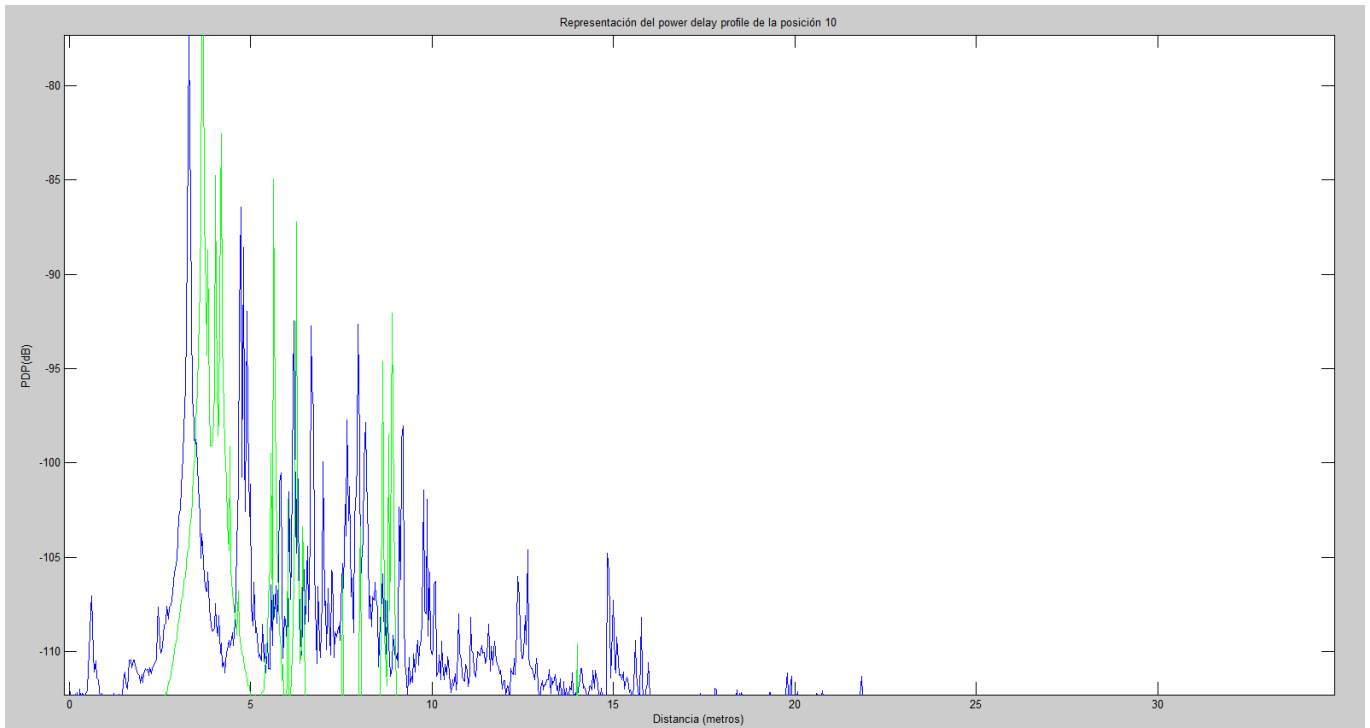
Gráfica 64. Direcciones de llegada en azimuth para la posición 8.



Gráfica 65. Direcciones de llegada en elevación para la posición 8.

Posición 10 con polarización copolar vertical.

El power delay profile obtenido para esta posición es el siguiente. Se muestra a su vez el correspondiente a las medidas para esa misma posición.



Gráfica 66. Power delay profile de la posición 10.

Los parámetros de caracterización del canal obtenidos para la posición 10 han sido los que se muestran en la tabla 41.

Parámetros simulados para la posición 10	
Valor del delay spread (nseg)	2,74
Valor de las pérdidas (dB)	71,19
Valor de la potencia relativa recibida (dB)	-71,19
Valor del máximo excess delay (nseg)	29,67

Tabla 41. Parámetros del canal de la posición 10.

Los valores obtenidos de dispersión angular y valor medio de los ángulos de la posición 10 son los mostrados en las tablas 42 y 43.

Dispersión angular para la posición 10 (grados)	
Dispersión angular de salida en azimut	23,60
Dispersión angular de salida en elevación	1,10
Dispersión angular de llegada en azimut	39,74
Dispersión angular de llegada en elevación	1,94

Tabla 42. Dispersión angular para la posición 10.

Valor medio de los ángulos para la posición 1 (grados)	
Valor medio de salida en azimut	-19,41
Valor medio de salida en elevación	91,62
Valor medio de llegada en azimut	7,40
Valor medio de llegada en elevación	88,87

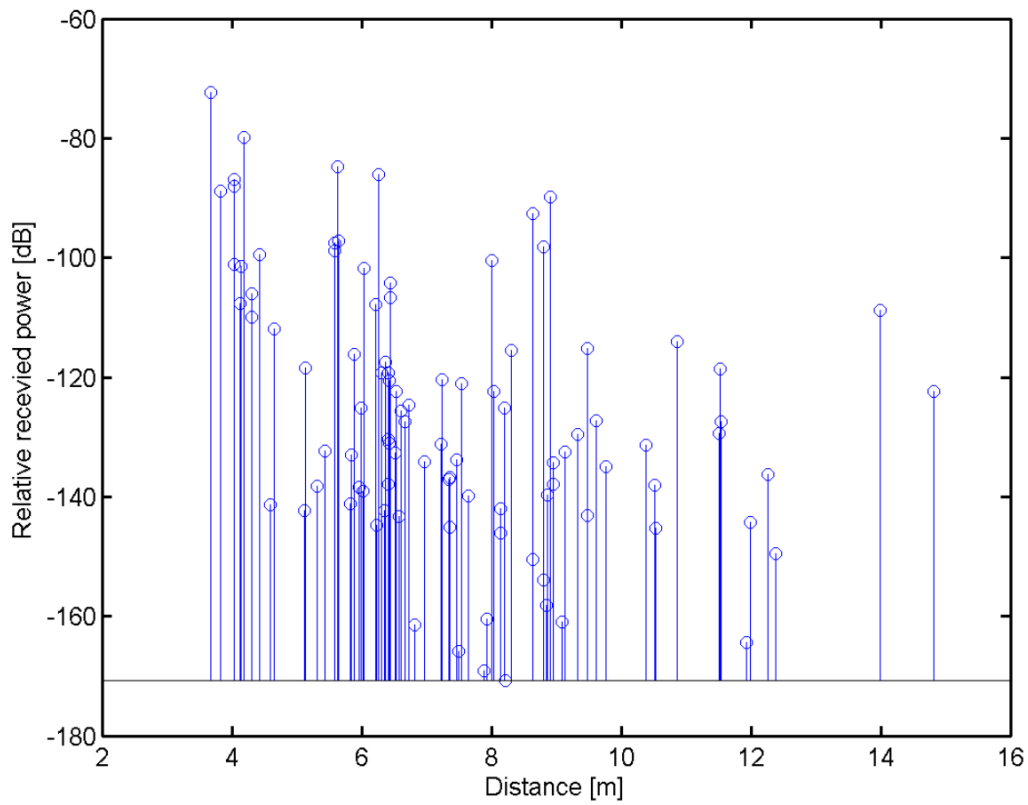
Tabla 43. Valor medio de los ángulos para la posición 10.

Otro parámetro de interés a tener en cuenta es el ángulo de salida del transmisor y el de llegada al receptor del rayo directo, al ser la contribución más energética. Sus valores para el caso de la posición 10 son los que se muestran en la tabla 44.

Posición	DoD	DoA
10	-23,82	23,82

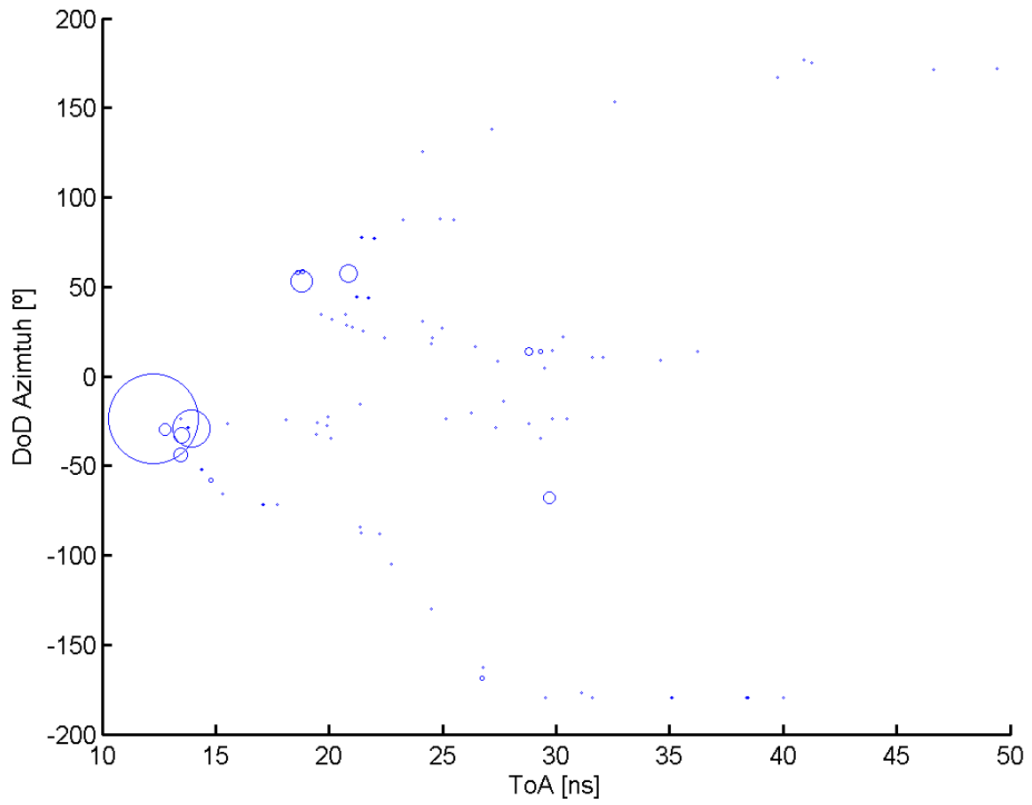
Tabla 44. Valor de los ángulos de llegada y salida de la posición 10.

Los valores obtenidos para la gráfica del CIR de la posición 10 son los siguientes.

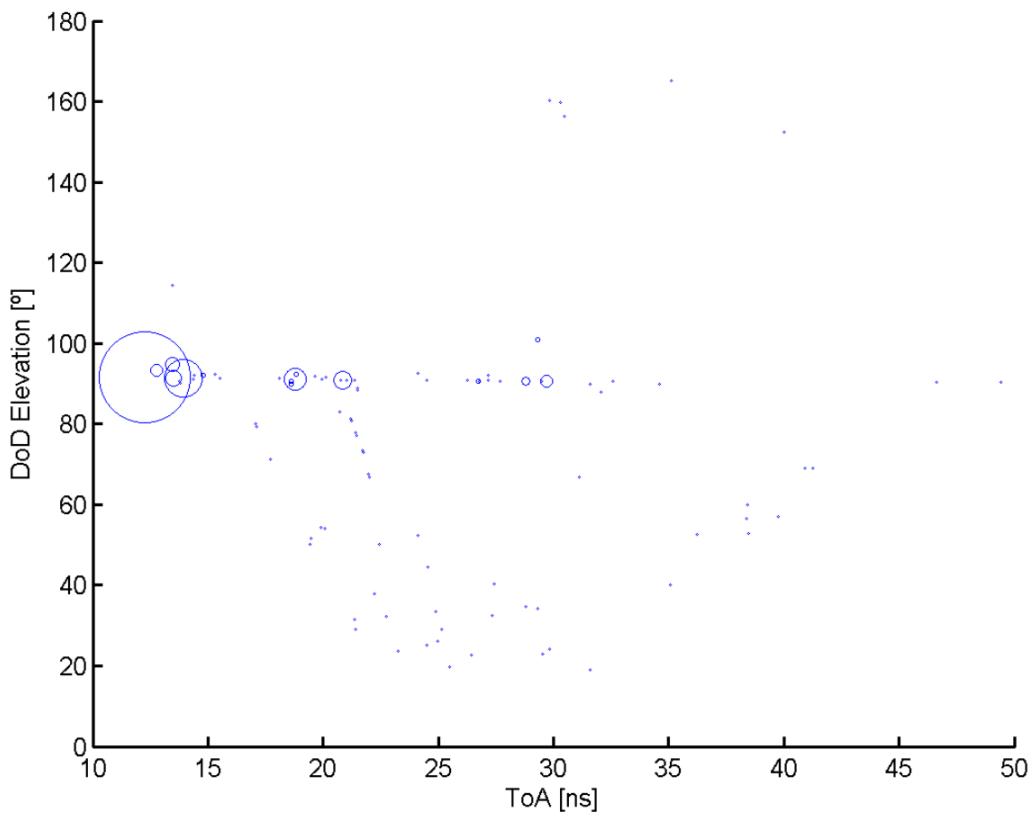


Gráfica 67. Gráfica del CIR para la posición 10.

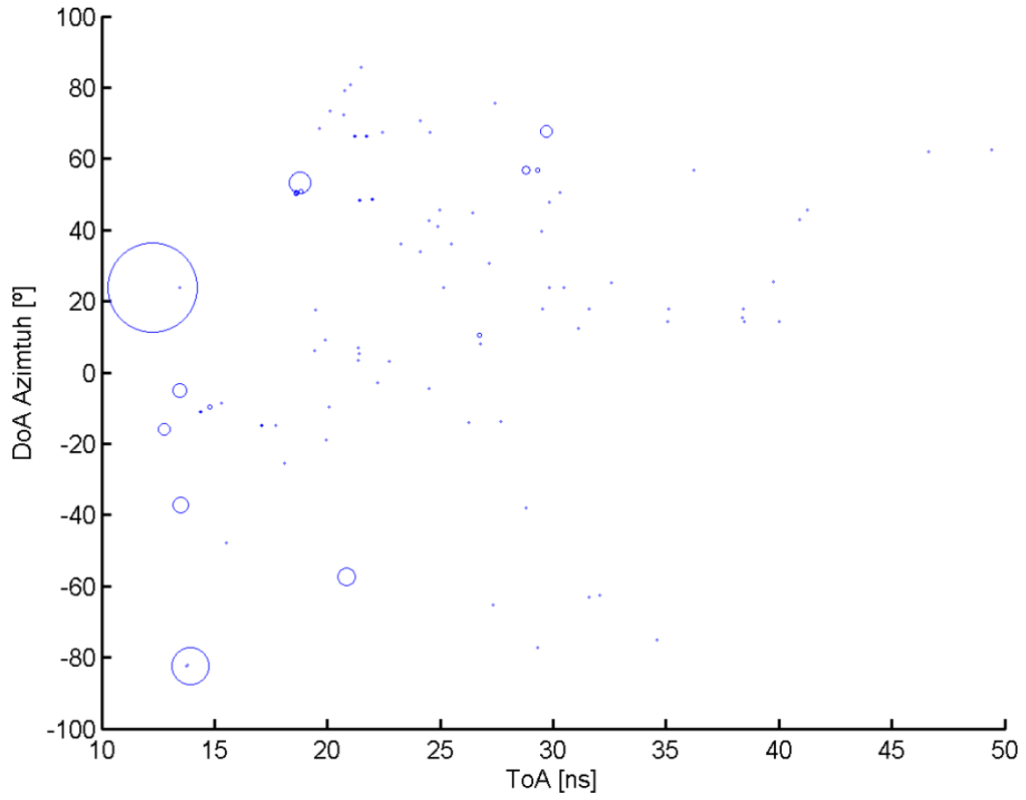
Las gráficas que relacionan el ángulo, la energía y el tiempo de llegada de las distintas contribuciones se muestran a continuación. Están para el caso de DoD y DoA en ambos planos de azimut y elevación.



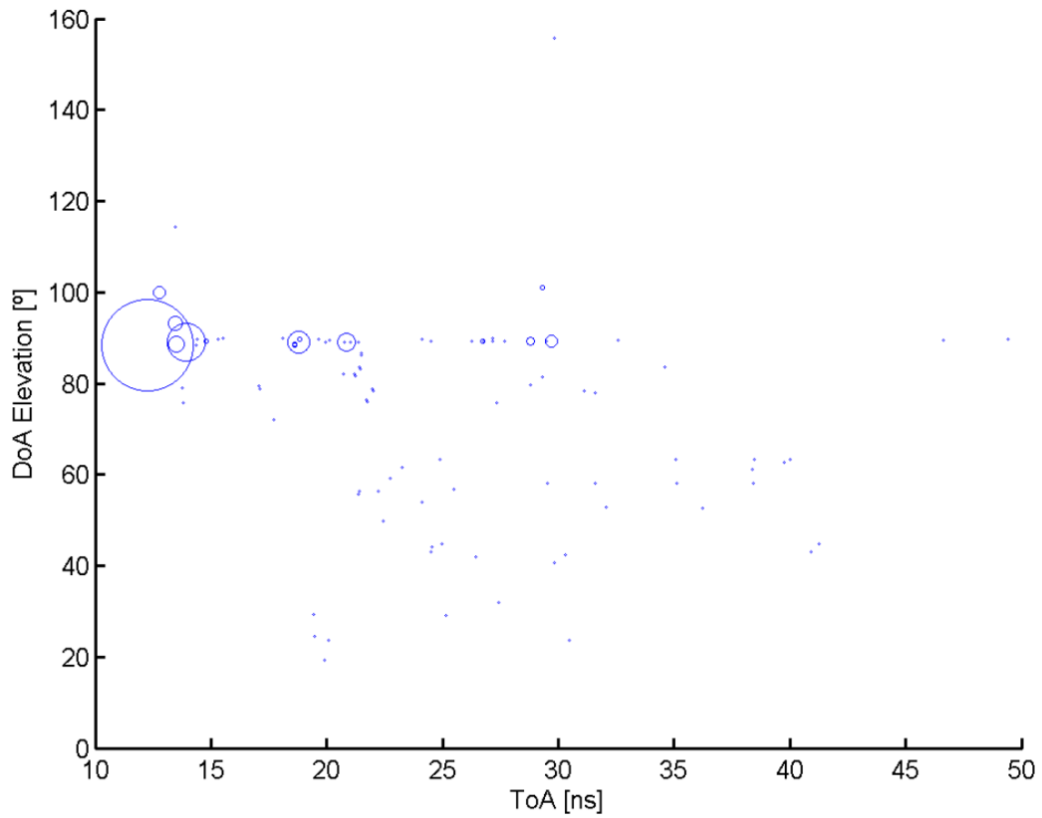
Gráfica 68. Direcciones de salida en azimuth para la posición 10.



Gráfica 69. Direcciones de salida en elevación para la posición 10.



Gráfica 70. Direcciones de llegada en azimuth para la posición 10.



Gráfica 71. Direcciones de llegada en elevación para la posición 10.

A modo de resumen para todas las posiciones, en la tabla 45 se muestran los resultados obtenidos mediante el simulador, lo que permitirá compararlos con los obtenidos a partir de las mediciones. Cabe destacar que se corresponden con el caso de simulación más completo.

Posición	Relative received power Pr (dB)	Delay spread DS (nanosegundos)	Maximum excess delay MED (nanosegundos)	Pérdidas (dB)
1	-73,33	3,02	33,11	73,33
2	-72,65	2,46	29,78	72,65
3	-72,02	2,40	28,78	72,02
4	-71,33	2,64	28,56	71,33
5	-70,41	2,21	28,22	70,41
6	-69,26	1,59	18,56	69,26
7	-66,45	1,25	17,67	66,45
8	-66,88	1,45	18,67	66,88
9	-70,11	2,48	28,00	70,11
10	-71,19	2,74	29,67	71,19
11	-70,72	2,58	30,22	70,72
12	-72,84	3,09	31,56	72,84
13	-73,26	2,76	31,56	73,26
14	-74,18	3,30	34,00	74,18
15	-74,18	3,47	39,89	74,18
16	-72,91	2,92	32,67	72,91
17	-73,51	2,90	33,22	73,51
Media	-71,48	2,54	29,07	71,48

Tabla 45. Parámetros obtenidos de las simulaciones a 60 GHz.

Una vez se han obtenido estos parámetros se puede comprobar la precisión de los mismos al ser comparados con la tabla que contiene los datos de las medidas. Para ello se ha elaborado una nueva tabla en la que se muestra para cada parámetro el porcentaje de error que se ha cometido a la hora de realizar las simulaciones. Cuanto más pequeño sea el valor, mejores serán los resultados.

Dicha tabla es la que se muestra a continuación.

Posición	Relative received power Pr (dB)	Delay spread DS (nanosegundos)	Maximum excess delay MED (nanosegundos)	Pérdidas (dB)
1	0,56%	54,08%	3,47%	0,56%
2	10,26%	97,01%	86,88%	10,26%
3	1,74%	20,79%	2,24%	1,74%
4	0,55%	15,38%	1,20%	0,55%
5	0,10%	16,93%	19,22%	0,10%
6	1,40%	23,56%	27,39%	1,40%
7	5,72%	25,48%	30,87%	5,72%
8	5,30%	60,70%	39,77%	5,30%
9	1,66%	1,98%	5,42%	1,66%
10	0,66%	7,03%	11,71%	0,66%
11	1,86%	3,37%	8,35%	1,86%
12	0,76%	15,73%	13,16%	0,76%
13	2,58%	18,34%	5,98%	2,58%
14	1,66%	15,79%	9,68%	1,66%
15	1,16%	15,67%	28,68%	1,16%
16	2,01%	37,74%	26,12%	2,01%
17	2,72%	26,95%	4,53%	2,72%
Media	2,39%	26,85%	19,10%	2,39%

Tabla 46. Precisión de las simulaciones respecto a las medidas para 60 GHz.

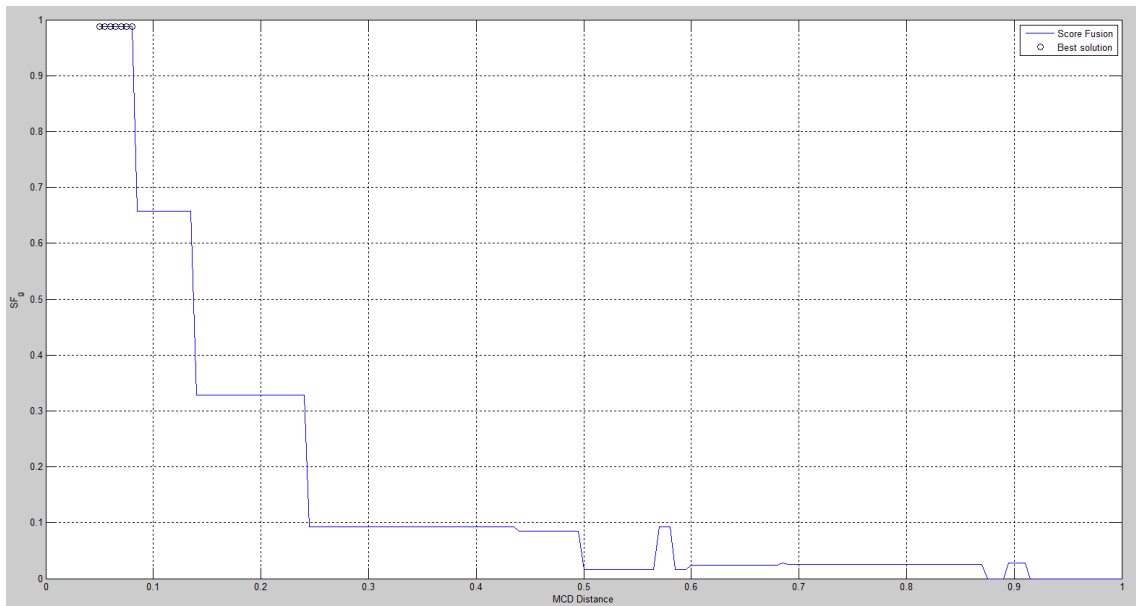
Como ya se mencionó en apartados anteriores, más adelante se comparará la precisión de las simulaciones a 60 GHz con las de 94 GHz, para ver cuál de ellas ha obtenido mejores resultados.

5.4 Clustering de los resultados para la banda de 60 GHz.

En este apartado se aplica de nuevo a los parámetros del canal obtenidos los procedimientos de clustering tratados en apartados anteriores.

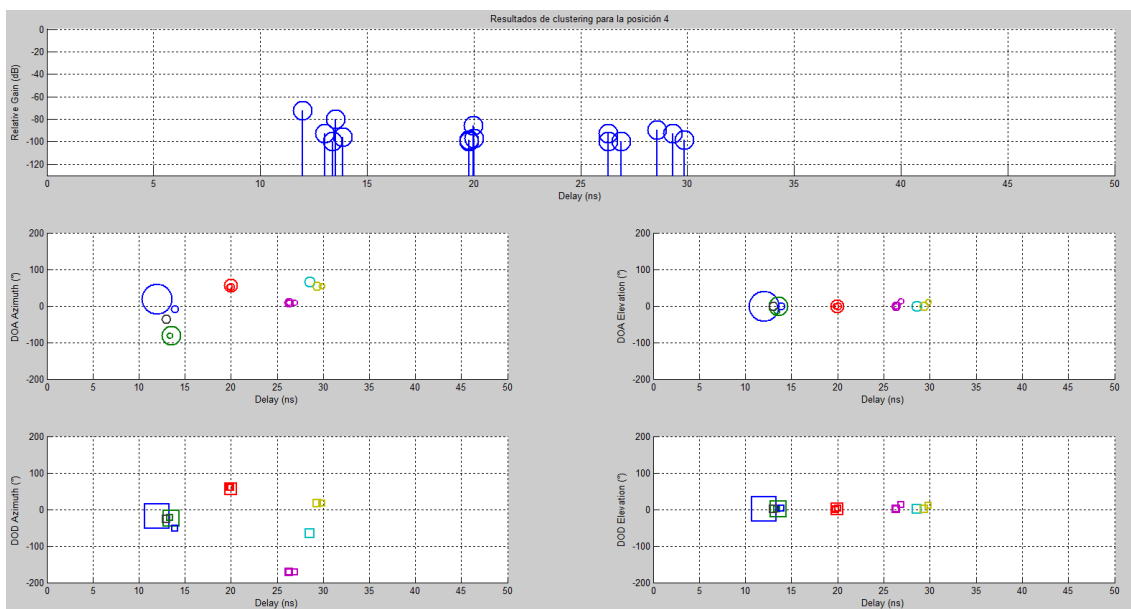
Resultados de clustering para la posición 4.

En la gráfica 72 se representa la función score fusión para la posición 4. De ella se obtiene el MCD óptimo para aplicar el algoritmo de clustering.



Gráfica 72. Score fusion de la posición 4.

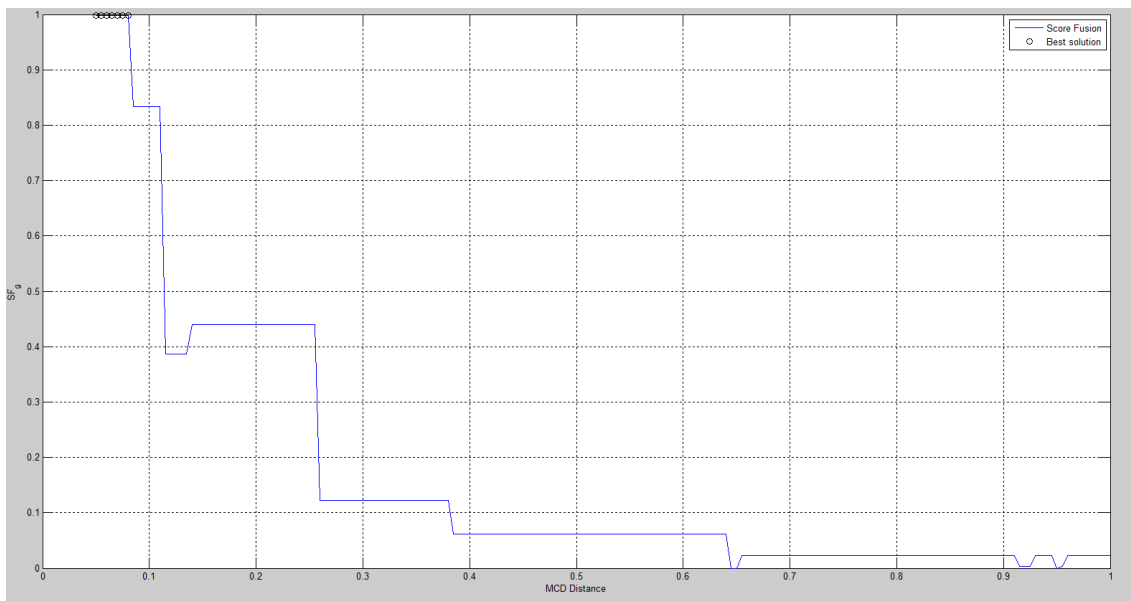
En la gráfica 73 se representan los resultados de clustering de la posición 4. Cada color hace referencia a un cluster distinto.



Gráfica 73. Clusters de la posición 4.

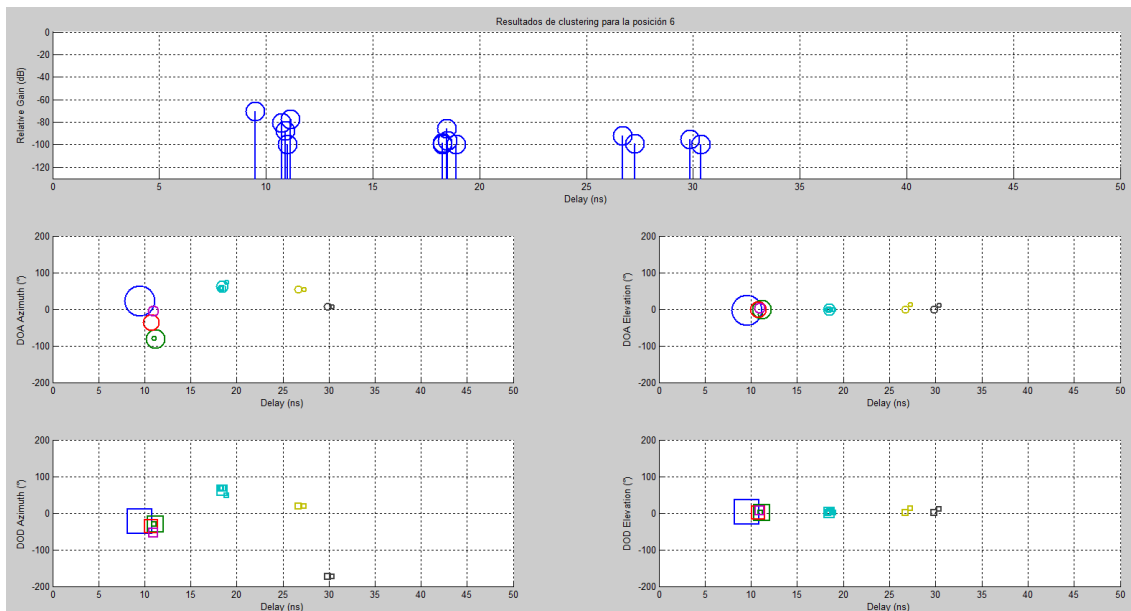
Resultados de clustering para la posición 6.

En la gráfica 74 se representa la función score fusión para la posición 6.



Gráfica 74. Score fusion de la posición 6.

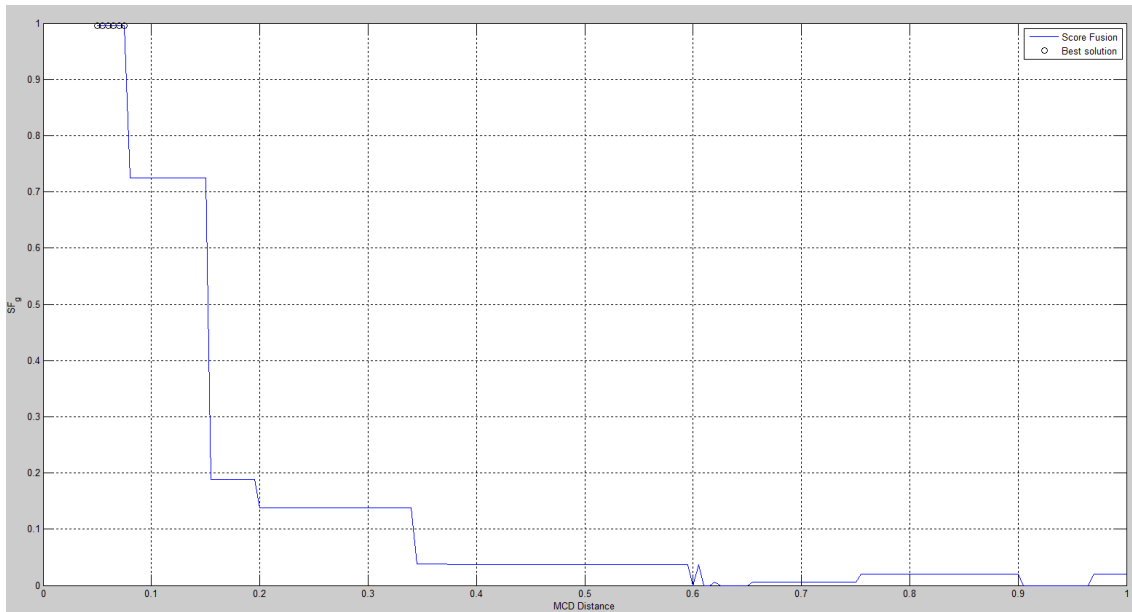
Los resultados de clustering de la posición 6 son los siguientes. Cada color hace referencia a un cluster distinto.



Gráfica 75. Clusters de la posición 6.

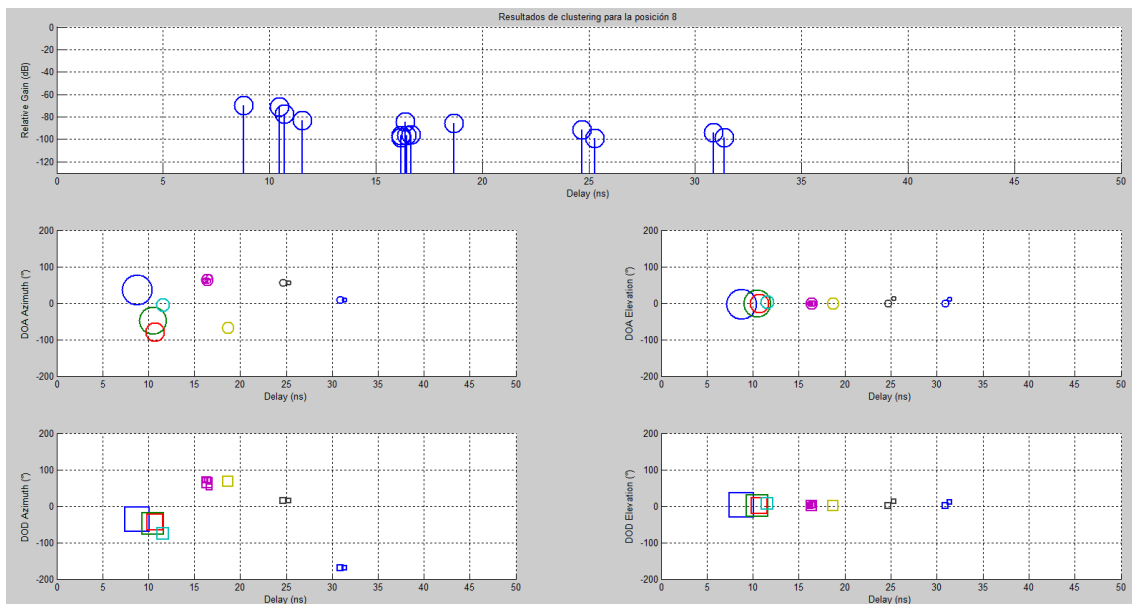
Resultados de clustering para la posición 8.

En la gráfica 76 se representa la función score fusión para la posición 8.



Gráfica 76. Score fusion de la posición 8.

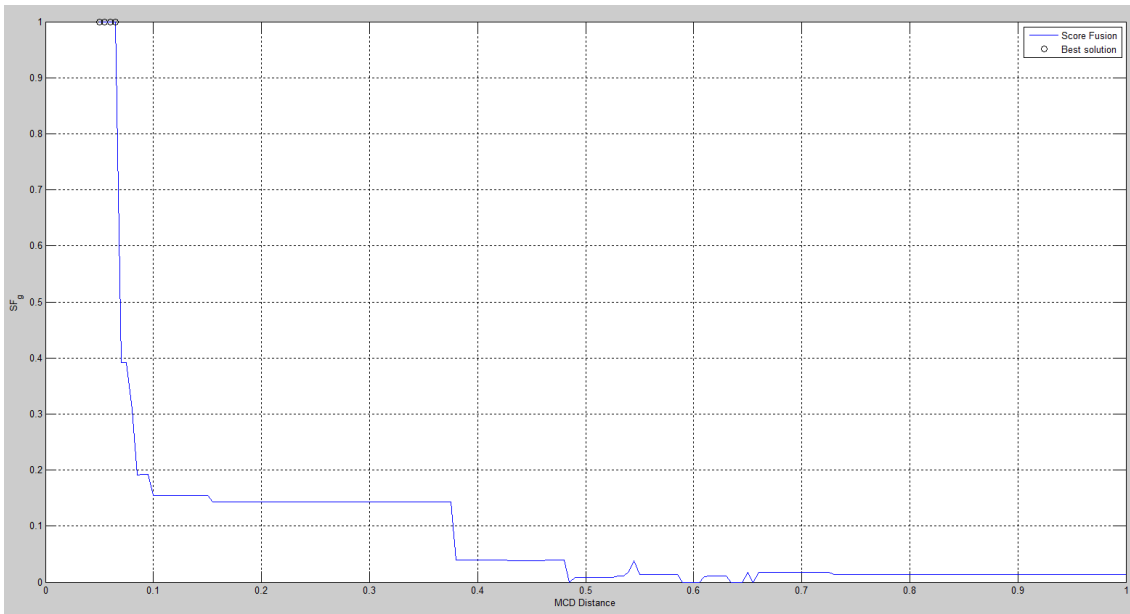
Los resultados de clustering de la posición 8 son los siguientes. Cada color hace referencia a un cluster distinto.



Gráfica 77. Clusters de la posición 8.

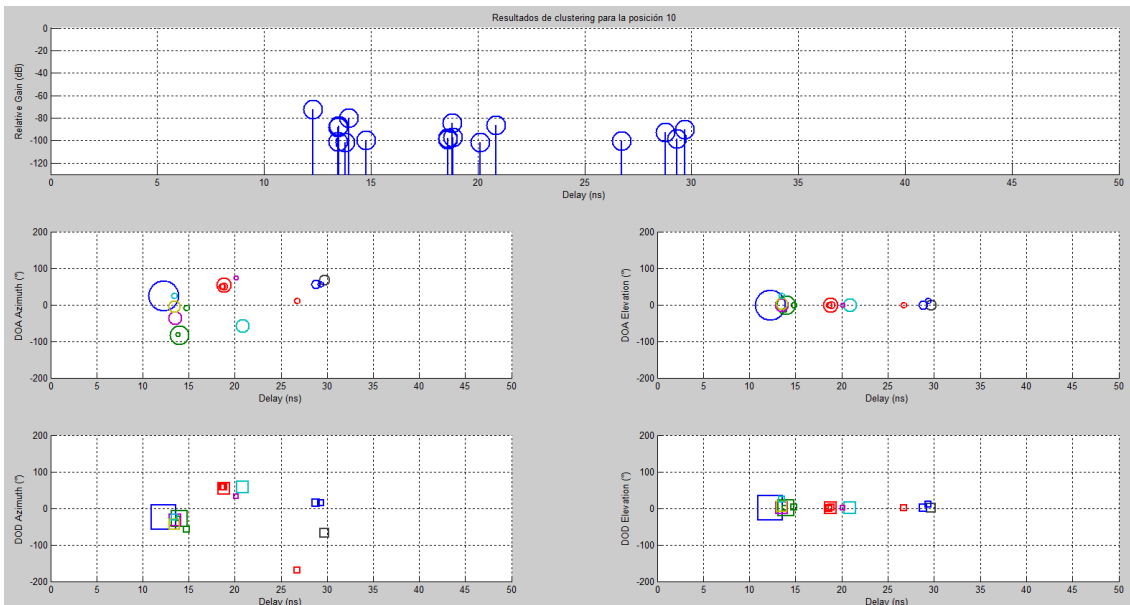
Resultados de clustering para la posición 10.

En la gráfica 78 se representa la función score fusión para la posición 10.



Gráfica 78. Score fusion de la posición 10.

Los resultados de clustering de la posición 10 son los siguientes. Cada color hace referencia a un cluster distinto.



Gráfica 79. Clusters de la posición 10.

A partir de las gráficas mostradas anteriormente y de los parámetros devueltos por el algoritmo de clustering podemos obtener todos los datos de interés para cada una de las posiciones de simulación para el caso de polarización copolar vertical, que es el único que se realizó durante la campaña de medidas

En la tabla 47 se muestra para el caso de polarización copolar vertical el número total de clusters que hay en cada posición de simulación, así como todos los rayos que los conforman.

Posición	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Núm. clusters	10	9	9	8	9	7	7	8	9	12	11	12	11	13	11	12	11
Rayos totales	16	16	16	15	14	14	11	14	15	17	21	18	18	17	20	18	18

Tabla 47. Número total de clusters y rayos de cada posición VV para 60 GHz.

En la tabla 48 se muestra para el caso de polarización copolar vertical, para cada uno de los clusters que hay en cada posición de simulación, el número de rayos que tiene cada uno.

Posición	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Cluster 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Cluster 2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	3	2	2	4	2	2	2
Cluster 3	4	4	4	4	4	1	1	1	1	4	4	4	4	1	4	4	4
Cluster 4	1	1	1	1	1	5	4	1	4	1	1	1	1	1	1	1	1
Cluster 5	2	2	2	3	1	1	1	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Cluster 6	2	2	2	2	1	2	1	1	1	1	1	2	2	1	2	1	2
Cluster 7	1	1	2	1	2	2	1	2	2	1	2	2	2	1	2	1	2
Cluster 8	1	2	1	1	1	-	-	2	2	2	2	1	2	2	1	2	1
Cluster 9	1	1	1	-	1	-	-	-	1	1	1	1	1	1	2	2	1
Cluster 10	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1	4	1	1	1	1	1	2
Cluster 11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	3	1	1
Cluster 12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1	-	1	-	1	-
Cluster 13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-

Tabla 48. Número de rayos en cada cluster VV para 60 GHz.

5.5 Comparación entre las bandas de 94 GHz y 60 GHz.

En el presente apartado se va a proceder a comparar las medidas y simulaciones de los casos de 94 GHz y 60 GHz, para ver de esta forma cuales son las principales conclusiones que se obtienen de las mismas.

Para empezar, se van a comparar las medias de los resultados obtenidos mediante las mediciones. Las de la banda de 94 GHz son las de la tabla 49.

Posición	Relative received power Pr (dB)		Delay spread DS (nanosegundos)		Maximum excess delay MED (nanosegundos)		Pérdidas (dB)	
	VV	HH	VV	HH	VV	HH	VV	HH
Media	-87,75	-88,24	4,83	4,90	34,64	34,44	87,75	88,24

Tabla 49. Medias medidas para la banda de 94 GHz.

Y para el caso de la banda de 60 GHz son las de la tabla 50.

Posición	Relative received power Pr (dB)		Delay spread DS (nanosegundos)		Maximum excess delay MED (nanosegundos)		Pérdidas (dB)	
	VV	HH	VV	HH	VV	HH	VV	HH
Media	-72,06		6,67		41,12		72,06	

Tabla 50. Medias medidas para la banda de 60 GHz.

Mediante la comparación de ambas tablas se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- La potencia relativa recibida (Pr) es mayor para el caso de 60 GHz que para el caso de 94 GHz, tanto para la polarización copolar vertical como para la horizontal de este último. Por lo tanto, la señal recibida es mejor para el caso de 60 GHz.
- El valor cuadrático medio del retardo de propagación (DS) es menor para ambas polarizaciones de 94 GHz, siendo el de 60 GHz mayor. Por lo tanto, la dispersión temporal de la potencia recibida en el receptor es mejor para el caso de 94 GHz.
- El exceso de retardo máximo (MED) también es menor para ambas polarizaciones de 94 GHz, siendo el de 60 GHz mayor de nuevo. Por lo tanto, este parámetro también tiene mejores resultados para el caso de 94 GHz.
- Para el caso de las pérdidas del canal, al obtenerse estas como la inversa de la potencia relativa recibida, son menores para el caso de 60 GHz que para ambos casos

de polarización de la banda de 94 GHz. Por lo tanto, las pérdidas de señal son menores para el caso de 60 GHz.

A continuación, se van a comparar las medias de los resultados obtenidos mediante las simulaciones. Las de la banda de 94 GHz son las de la tabla 51.

Posición	Relative received power Pr (dB)		Delay spread DS (nanosegundos)		Maximum excess delay MED (nanosegundos)		Pérdidas (dB)	
	VV	HH	VV	HH	VV	HH	VV	HH
Media	-88,59	-99,71	3,65	4,75	30,73	35,16	88,59	99,71

Tabla 51. Medias simuladas para la banda de 94 GHz.

Y para el caso de la banda de 60 GHz son las de la tabla 52.

Posición	Relative received power Pr (dB)		Delay spread DS (nanosegundos)		Maximum excess delay MED (nanosegundos)		Pérdidas (dB)	
	VV	HH	VV	HH	VV	HH	VV	HH
Media	-71,48		2,54		29,07		71,48	

Tabla 52. Medias simuladas para la banda de 60 GHz.

De nuevo, mediante la comparación de ambas tablas se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- La potencia relativa recibida (Pr) es mayor para el caso de 60 GHz que para el caso de 94 GHz, tanto para la polarización copolar vertical como para la horizontal de este último. Por lo tanto, la señal recibida es mejor para el caso de 60 GHz, tal y como se obtenía para las medidas.
- El valor cuadrático medio del retardo de propagación (DS) es menor para el caso de 60 GHz que para ambas polarizaciones para el caso de 94 GHz. Por lo tanto, la dispersión temporal de la potencia recibida en el receptor es mejor para el caso de 60 GHz. Esto se debe a que, mientras los resultados del delay spread de las simulaciones a 94 GHz han mantenido resultados bastante parecidos a los de las medidas, para el caso de 60 GHz los resultados simulados son mucho más optimistas que los reflejados por las medidas, dando lugar a este error.
- De forma parecida al punto anterior, el exceso de retardo máximo (MED) también es menor para el caso de 60 GHz, siendo mayores los de las polarizaciones copolares de 94 GHz. De nuevo los valores simulados para 94 GHz son similares a los medidos, pero

para 60 GHz salen resultados menores. Por lo tanto, este parámetro también tiene mejores resultados para el caso de 60 GHz.

- Para el caso de las pérdidas del canal, al obtenerse estas como la inversa de la potencia relativa recibida, son menores para el caso de 60 GHz que para ambos casos de polarización de la banda de 94 GHz. Por lo tanto, las pérdidas de señal son menores para el caso de 60 GHz, lo mismo que ocurría con las medidas.

De todo esto se puede concluir que mientras los valores de potencia relativa recibida y pérdidas se obtienen de manera bastante precisa para ambas bandas de frecuencia, los valores del valor cuadrático medio del retardo de propagación y el exceso de retardo máximo sufren considerables variaciones para el caso de 60 GHz, mientras que para el caso de 94 GHz estos valores se mantienen estables y similares tanto para medidas como simulaciones.

Otro aspecto que se puede comparar entre ambas bandas de frecuencias son los resultados de clustering. En la tabla 53 se muestra la media de rayos representados así como la media de clusters de todas las posiciones de medida.

Caso	94 GHz	60 GHz
Media de clusters	11,93	9,73
Media de rayos totales	15,87	16,13

Tabla 53. Medias de los resultados de clustering.

De ella se puede observar que el número de rayos que cumplen unas determinadas propiedades es mayor para el caso de 60 GHz que el de 94 GHz. También se ve que el número de clusters es menor para el caso de 60 GHz (menor dispersión de los rayos), lo que quiere decir que los rayos están más relacionados y compactos entre sí al poseer ángulos de llegada/salida y retardos similares entre sí.

6. Conclusiones.

Utilizando el trazador de rayos diseñado mediante Matlab para simular las propiedades de propagación de una de las salas del ELDI de la escuela técnica superior de ingeniería de telecomunicaciones, se han calculado los parámetros que permiten caracterizar de forma precisa el canal de comunicación y compararlas con las que se habían obtenido de forma empírica mediante mediciones en las bandas de frecuencias de 60 GHz y 94 GHz. Una vez hecho esto se ha aplicado un algoritmo de clustering a las simulaciones para agrupar a los datos en clusters que compartan propiedades similares, para ser más exactos ángulos y retardos similares.

Se ha tratado siempre de encontrar un equilibrio entre el realismo de la simulación y el coste computacional del mismo. Aun habiendo obtenido resultados satisfactorios, cabe destacar que las diferencias existentes entre medidas y simulaciones se deben a que la cantidad de mecanismos de propagación que se han de tener en cuenta es muy alta, algunos de ellos muy impredecibles o difíciles de implementar, y a veces un pequeño aumento de realismo supone un coste computacional muy alto que no merece la pena, como podría haber sido la inclusión de componentes de escater de segundo orden.

Al final se ha llegado a una serie de resultados que presentan valores muy similares entre todas las simulaciones y las mediciones que se han realizado hasta el momento, lo cual indica que la simulación mediante el trazado de rayos de un canal de propagación en entornos interiores refleja con precisión la estructura general, parámetros principales y estadísticas de los datos recopilados empíricamente. Por lo tanto, las simulaciones mediante trazado de rayos pueden considerarse razonablemente fiables para generar datos que caractericen las características temporales y espaciales de entornos multicamino interiores, sin necesidad de costosas mediciones de campo, que era el objetivo que se perseguía con la realización del presente proyecto.

Otro estudio que se ha realizado ha sido la comparación de los resultados obtenidos en las bandas de 94 GHz y 60 GHz entre sí, y se ha observado que mientras que para la banda de 60 GHz la potencia que se recibía y las pérdidas eran mejores que para el caso de 94 GHz, se producía cierto error en otros parámetros de caracterización del canal al comparar las medidas con sus simulaciones, mientras que para 94 GHz se obtenían resultados muy similares en todos los parámetros. Algo similar se ha hecho con el algoritmo de agrupamiento o clustering, donde se ha podido observar que los rayos pueden ser más agrupados para el caso de 60 GHz que el de 94 GHz al presentar más similitudes entre los mismos.

Posibles líneas futuras de trabajo podrían ser conseguir un mejorado funcionamiento del trazador de rayos, que permita obtener los parámetros del canal de transmisión de

forma más precisa sin un aumento excesivo del tiempo de computación. También podría considerarse la creación una posible interfaz de usuario, con el editor de GUIs de Matlab por ejemplo, permitiendo así que el simulador sea más fácil de usar e intuitivo, así como que permita introducir las características del canal de transmisión que se deseen, que se puedan analizar distintos tipos de recintos y crear así una aplicación que puede incluso llegar a ser comercializada.

7. Índice de figuras, gráficas y tablas.

•Figura 1. Representación de la primera zona de Fresnel.....	5
•Figura 2. Fenómenos considerados al modelar un canal radioeléctrico.....	6
•Figura 3. Reflexión de las ondas en una superficie plana.....	7
•Figura 4. Para rendijas muy grandes no se aprecia la difracción.....	8
•Figura 5. Difracción para distintos tamaños de rendija.....	9
•Figura 6. Refracción de la onda entre dos medios de propagación.....	10
•Figura 7. Reflexión difusa de una onda.....	11
•Figura 8. Efectos de fase constructiva y destructiva.....	12
•Figura 9. Ejemplo de sistema de reutilización de frecuencias.....	13
•Figura 10. Sistema punto-multipunto que abarca diferentes servicios.....	15
•Figura 11. Pasos del algoritmo K-means.....	17
•Figura 12. Ejemplo de algoritmo K-means MCD para clustering.....	18
•Figura 13. Imagen real del escenario de estudio.....	21
•Figura 14. Plano de la habitación donde se realizará el estudio.....	22
•Figura 15. Sistema de referencia para medida de las distancias.....	22
•Figura 16. Situación de los puntos dentro de la habitación para 94 GHz.....	23
•Figura 17. Situación de los puntos dentro de la habitación para 60 GHz.....	24
•Figura 18. Analizador de redes usado para realizar las medidas.....	26
•Figura 19. Ejemplo de parámetros de simulación de entrada.....	35
•Figura 20. Distribución de la malla de puntos alrededor de la posición de medida.....	35
•Figura 21. Parámetros obtenidos para 'un_punto_una_frec' igual a 0.....	36
•Figura 22. Parámetros obtenidos para 'un_punto_una_frec' igual a 1.....	36
•Figura 23. Diagrama de radiación en el plano de azimuth de la antena.....	40
•Figura 24. Función 'desvio_diagrama_100GHz'.....	41
•Figura 25. Sistema de referencia para la toma de los ángulos.....	43

•Gráfica 1. Atenuación en dB/km en función de la frecuencia.....	14
•Gráfica 2. Agrupamiento de datos similares en grupos o clusters.....	16
•Gráfica 3. Representación gráfica de los parámetros del canal.....	32
•Gráfica 4. Ejemplo de gráfica de CIR.....	38
•Gráfica 5. Potencia recibida, ángulo de llegada e instante temporal.....	39
•Gráfica 6. Comparación inicial del PDP de las medidas y simulaciones.....	41
•Gráfica 7. Comparación inicial del PDP de las medidas y simulaciones corregidas.....	42
•Gráfica 8. Simulación con una sola reflexión (I).....	45
•Gráfica 9. Comparación entre PDP simulado y medido (I).....	46
•Gráfica 10. Comparación entre PDP simulado y medido (II).....	46
•Gráfica 11. Comparación entre PDP simulado y medido (III).....	47
•Gráfica 12. Power delay profile de la posición 1.....	48
•Gráfica 13. Gráfica del CIR para la posición 1.....	50
•Gráfica 14. Direcciones de salida en azimut para la posición 1.....	50
•Gráfica 15. Direcciones de salida en elevación para la posición 1.....	51
•Gráfica 16. Direcciones de llegada en azimut para la posición 1.....	51
•Gráfica 17. Direcciones de llegada en elevación para la posición 1.....	52
•Gráfica 18. Power delay profile de la posición 3.....	52
•Gráfica 19. Gráfica del CIR para la posición 3.....	54
•Gráfica 20. Direcciones de salida en azimut para la posición 3.....	55
•Gráfica 21. Direcciones de salida en elevación para la posición 3.....	55
•Gráfica 22. Direcciones de llegada en azimut para la posición 3.....	56
•Gráfica 23. Direcciones de llegada en elevación para la posición 3.....	56
•Gráfica 24. Power delay profile de la posición 5.....	57
•Gráfica 25. Gráfica del CIR para la posición 5.....	59
•Gráfica 26. Direcciones de salida en azimut para la posición 5.....	59

•Gráfica 27. Direcciones de salida en elevación para la posición 5.....	60
•Gráfica 28. Direcciones de llegada en azimut para la posición 5.....	60
•Gráfica 29. Direcciones de llegada en elevación para la posición 5.....	61
•Gráfica 30. Power delay profile de la posición 7.....	61
•Gráfica 31. Gráfica del CIR para la posición 7.....	63
•Gráfica 32. Direcciones de salida en azimut para la posición 7.....	64
•Gráfica 33. Direcciones de salida en elevación para la posición 7.....	64
•Gráfica 34. Direcciones de llegada en azimut para la posición 7.....	65
•Gráfica 35. Direcciones de llegada en elevación para la posición 7.....	65
•Gráfica 36. Score fusion de la posición 1.....	68
•Gráfica 37. Clusters de la posición 1.....	69
•Gráfica 38. Score fusion de la posición 3.....	69
•Gráfica 39. Clusters de la posición 3.....	70
•Gráfica 40. Score fusion de la posición 5.....	70
•Gráfica 41. Clusters de la posición 5.....	71
•Gráfica 42. Score fusion de la posición 7.....	71
•Gráfica 43. Clusters de la posición 7.....	72
•Gráfica 44. Simulación con una sola reflexión (II).....	76
•Gráfica 45. Comparación entre PDP simulado y medido (IV).....	77
•Gráfica 46. Comparación entre PDP simulado y medido (V).....	77
•Gráfica 47. Comparación entre PDP simulado y medido (VI).....	78
•Gráfica 48. Power delay profile de la posición 4.....	79
•Gráfica 49. Gráfica del CIR para la posición 4.....	81
•Gráfica 50. Direcciones de salida en azimut para la posición 4.....	81
•Gráfica 51. Direcciones de salida en elevación para la posición 4.....	82
•Gráfica 52. Direcciones de llegada en azimut para la posición 4.....	82

•Gráfica 53. Direcciones de llegada en elevación para la posición 4.....	83
•Gráfica 54. Power delay profile de la posición 6.....	83
•Gráfica 55. Gráfica del CIR para la posición 6.....	85
•Gráfica 56. Direcciones de salida en azimut para la posición 6.....	86
•Gráfica 57. Direcciones de salida en elevación para la posición 6.....	86
•Gráfica 58. Direcciones de llegada en azimut para la posición 6.....	87
•Gráfica 59. Direcciones de llegada en elevación para la posición 6.....	87
•Gráfica 60. Power delay profile de la posición 8.....	88
•Gráfica 61. Gráfica del CIR para la posición 8.....	90
•Gráfica 62. Direcciones de salida en azimut para la posición 8.....	90
•Gráfica 63. Direcciones de salida en elevación para la posición 8.....	91
•Gráfica 64. Direcciones de llegada en azimut para la posición 8.....	91
•Gráfica 65. Direcciones de llegada en elevación para la posición 8.....	92
•Gráfica 66. Power delay profile de la posición 10.....	92
•Gráfica 67. Gráfica del CIR para la posición 10.....	94
•Gráfica 68. Direcciones de salida en azimut para la posición 10.....	95
•Gráfica 69. Direcciones de salida en elevación para la posición 10.....	95
•Gráfica 70. Direcciones de llegada en azimut para la posición 10.....	96
•Gráfica 71. Direcciones de llegada en elevación para la posición 10.....	96
•Gráfica 72. Score fusion de la posición 4.....	99
•Gráfica 73. Clusters de la posición 4.....	99
•Gráfica 74. Score fusion de la posición 6.....	100
•Gráfica 75. Clusters de la posición 6.....	100
•Gráfica 76. Score fusion de la posición 8.....	101
•Gráfica 77. Clusters de la posición 8.....	101
•Gráfica 78. Score fusion de la posición 10.....	102

•Gráfica 79. Clusters de la posición 10.....	102
•Tabla 1. Distancias para cada punto dentro de la habitación a 94 GHz.....	24
•Tabla 2. Distancias para cada punto dentro de la habitación a 60 GHz.....	25
•Tabla 3. Parámetros de las medidas a 94 GHz.....	27
•Tabla 4. Parámetros de las medidas a 60 GHz.....	27
•Tabla 5. Parámetros obtenidos de las medidas a 94 GHz.....	45
•Tabla 6. Parámetros del canal de la posición 1.....	48
•Tabla 7. Dispersión angular para la posición 1.....	49
•Tabla 8. Valor medio de los ángulos para la posición 1.....	49
•Tabla 9. Valor de los ángulos de llegada y salida de la posición 1.....	49
•Tabla 10. Parámetros del canal de la posición 3.....	53
•Tabla 11. Dispersión angular para la posición 3.....	53
•Tabla 12. Valor medio de los ángulos para la posición 3.....	53
•Tabla 13. Valor de los ángulos de llegada y salida de la posición 3.....	53
•Tabla 14. Parámetros del canal de la posición 5.....	57
•Tabla 15. Dispersión angular para la posición 5.....	58
•Tabla 16. Valor medio de los ángulos para la posición 5.....	58
•Tabla 17. Valor de los ángulos de llegada y salida de la posición 5.....	58
•Tabla 18. Parámetros del canal de la posición 7.....	62
•Tabla 19. Dispersión angular para la posición 7.....	62
•Tabla 20. Valor medio de los ángulos para la posición 7.....	62
•Tabla 21. Valor de los ángulos de llegada y salida de la posición 7.....	62
•Tabla 22. Parámetros obtenidos de las simulaciones a 94 GHz.....	66
•Tabla 23. Precisión de las simulaciones respecto a las medidas para 94 GHz.....	67

•Tabla 24. Número total de clusters y rayos de cada posición VV para 94 GHz.....	72
•Tabla 25. Número de rayos en cada cluster VV para 94 GHz.....	73
•Tabla 26. Número total de clusters y rayos de cada posición HH para 94 GHz.....	73
•Tabla 27. Número de rayos en cada cluster HH para 94 GHz.....	74
•Tabla 28. Parámetros obtenidos de las medidas a 60 GHz.....	75
•Tabla 29. Parámetros del canal de la posición 4.....	79
•Tabla 30. Dispersión angular para la posición 4.....	80
•Tabla 31. Valor medio de los ángulos para la posición 4.....	80
•Tabla 32. Valor de los ángulos de llegada y salida de la posición 4.....	80
•Tabla 33. Parámetros del canal de la posición 6.....	84
•Tabla 34. Dispersión angular para la posición 6.....	84
•Tabla 35. Valor medio de los ángulos para la posición 6.....	84
•Tabla 36. Valor de los ángulos de llegada y salida de la posición 6.....	84
•Tabla 37. Parámetros del canal de la posición 8.....	88
•Tabla 38. Dispersión angular para la posición 8.....	89
•Tabla 39. Valor medio de los ángulos para la posición 8.....	89
•Tabla 40. Valor de los ángulos de llegada y salida de la posición 8.....	89
•Tabla 41. Parámetros del canal de la posición 10.....	93
•Tabla 42. Dispersión angular para la posición 10.....	93
•Tabla 43. Valor medio de los ángulos para la posición 10.....	93
•Tabla 44. Valor de los ángulos de llegada y salida de la posición 10.....	93
•Tabla 45. Parámetros obtenidos de las simulaciones a 60 GHz.....	97
•Tabla 46. Precisión de las simulaciones respecto a las medidas para 60 GHz.....	98
•Tabla 47. Número total de clusters y rayos de cada posición VV para 60 GHz.....	103
•Tabla 48. Número de rayos en cada cluster VV para 60 GHz.....	103
•Tabla 49. Medias medidas para la banda de 94 GHz.....	104

- Tabla 50. Medias medidas para la banda de 60 GHz.....104
- Tabla 51. Medias simuladas para la banda de 94 GHz.....105
- Tabla 52. Medias simuladas para la banda de 60 GHz.....105
- Tabla 53. Medias de los resultados de clustering.....106

8. Bibliografía.

[1] “Modelado de Canal Inalámbrico”, [Online] Disponible en:

https://eva.fing.edu.uy/pluginfile.php/72618/mod_resource/content/1/canal_aire.pdf

[2] “Distancias en la región de Fresnel”, [Online] Disponible en:

https://es.wikipedia.org/wiki/Zona_de_Fresnel

[3] “Etapas que componen un sistema de comunicación inalámbrico”, [Online] Disponible en:

<http://fmre.mx/boletinesx/2010/boletin1029.html>

[4] “Reflexión de las ondas en superficie plana”, [Online] Disponible en:

<http://intercentres.edu.gva.es/iesleonardodavinci/fisica/Ondas/Ondas09.htm>

[5] “Fenómeno de difracción”, [Online] Disponible en:

<http://intercentres.edu.gva.es/iesleonardodavinci/fisica/Ondas/Ondas10.htm>.

[6] “Distintas rendijas en difracción”, [Online] Disponible en:

<http://intercentres.edu.gva.es/iesleonardodavinci/fisica/Ondas/Ondas10.htm>.

[7] “Fenómeno de refracción”, [Online] Disponible en:

<http://intercentres.edu.gva.es/iesleonardodavinci/fisica/Ondas/Ondas09.htm>

[8] “Diffuse reflection”, [Online] Disponible en:

<https://electromagneticspectrummichael.weebly.com/reflection.html>

[9] "Wave interactions", [Online] Disponible en:

<https://9-1obrien.wikispaces.com/Wave+Interactions>

[10] "Reutilización de frecuencias en una red de celdas", [Online] Disponible en:

https://es.wikipedia.org/wiki/Historia_del_tel%C3%A9fono_m%C3%B3vil

[11] "Efecto de la troposfera", [Online] Disponible en:

<http://slideplayer.es/slide/3615831/>

[12] "Atenuación por gases e hidrometeoros", [Online] Disponible en:

<http://publicaciones.urbe.edu/index.php/telematique/article/viewArticle/903/2243>

[13] "Red punto-multipunto", [Online] Disponible en:

http://netkrom.com/legado/prod_ispair_cpe350.php

[14] Shiqi Cheng, María Teresa Martínez, Davy P. Gaillot, Jose María Molina, Juan Pascual García, Martine Liénard, Pierre Degauque, "Performance of a Novel Automatic Identification Algorithm for the Clustering of Radio Channel Parameters", 2015.

[15] "Clustering algorithm results", [Online] Disponible en:

<https://cssanalytics.wordpress.com/2013/11/26/fast-threshold-clustering-algorithm-ftca/>

[16] W. Wang and Y. Zhang, "On fuzzy cluster validity indices", " Fuzzy Sets Syst", 2007.

[17] "Algoritmo k-means", [Online] Disponible en:

<https://es.wikipedia.org/wiki/K-means>

[18] C. Schneider, M. Ibraheam, S. Hafner, M. Kaske, M. Hein, y R. S. Thoma, "On the reliability of multipath cluster estimation in realistic channel data sets", 2014.

[19] Shiqi Cheng, María Teresa Martínez, Davy P. Gaillot, Jose María Molina, Juan Pascual García, Martine Liénard, Pierre Degauque, "Performance of a Novel Automatic Identification Algorithm for the Clustering of Radio Channel Parameters", 2015.

[20] M. Steinbauer, H. Ozelik, H. Hofstetter, C. F. Mecklenbrauker, and E. Bonek, "How to quantify multipath separation", 2002.

[21] N. Czink, P. Cera, J. Salo, E. Bonek, J.-P. Nuutinen, and J. Ylitalo, "Improving clustering performance using multipath component distance", 2006.

[22] "Rohde & Schwarz ZVA 67", [Online] Disponible en:

<http://anysilicon.com/rohde-schwarz-america-da-integrated-collaborate-ic-tester-advanced-rf-millimeter-wave-integrated-circuits/>