

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



*Trabajo Fin de Grado*

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE UN  
SOFTWARE DE CARACTERIZACIÓN DE  
CANAL RADIO EN LA BANDA DE 10 A  
60 GHz**

**(Performance study of a radio channel  
characterization software in the band of 10 to  
60 GHz)**

Para acceder al Título de

***Graduado en  
Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación***

Autor: Andrés Calleja Reigadas

Julio - 2018

**GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE  
TELECOMUNICACIÓN**

**CALIFICACIÓN DEL TRABAJO FIN DE GRADO**

**Realizado por:** Andrés Calleja Reigadas

**Director del TFG:** Luis Valle López

**Título:** “Estudio del comportamiento de un software de caracterización de canal radio en la banda de 10 a 60 GHz”

**Title:** “Performance study of a radio channel characterization software in the band of 10 to 60 GHz”

**Presentado a examen el día:**

para acceder al Título de

**GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE  
TELECOMUNICACIÓN**

Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre):

Secretario (Apellidos, Nombre):

Vocal (Apellidos, Nombre):

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de: .....

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del TFG  
(sólo si es distinto del Secretario)

V° B° del Subdirector

Trabajo Fin de Grado N° (a    asignar  
por Secretaría)

# Agradecimientos

A Luis Valle por darme la oportunidad de realizar este trabajo bajo su tutela. Gracias por toda la ayuda, el apoyo, los consejos y la confianza que ha depositado en mí durante estos meses. Además, gracias a él he adquirido nuevos conocimientos que sin duda me serán muy útiles.

Al resto de gente que forma parte del grupo GISAR, por su ayuda en algunos momentos del proyecto, por el libre acceso al laboratorio y por poder utilizar tanto sus equipos como sus programas.

A mis padres y hermano por estar siempre ahí en todo momento ya fuese bueno o malo, siempre habéis estado ahí para darme ánimos, apoyo o ayuda. Sin vosotros no hubiese podido llegar a estar escribiendo estas líneas.

A Camila por todos los ánimos y su apoyo a lo largo de estos dos últimos años, por haber hechos que dos años muy duros hayan sido bastante más llevaderos.

A todas las personas, profesores, amigos, familiares, compañeros...todo aquel que ha formado parte de mi vida y de los que me he aprendido algo ya fuese a nivel personal o académico. Sin estas enseñanzas o vivencias no estaría aquí defendiendo mi TFG.

Esto solo es una pequeña muestra de lo agradecido que estoy con todos vosotros. Con estas líneas no puedo hacer justicia a todo lo que os debo, pero son eso, unas líneas. Cada uno de vosotros sabe lo que ha hecho para que hoy pueda estar aquí y por todo eso os doy las gracias. Prometo no desaprovecharlo.

Muchas gracias a todos.

# Índice

1. Introducción.....	1
2. Simulación de sistemas de comunicaciones móviles .....	4
2.1. Óptica geométrica .....	5
2.2. Teoría uniforme de la difracción .....	6
2.3. Estudios proporcionados por CINDOOR.....	8
2.2.1. Procesado geométrico.....	8
2.2.2. Trazado de rayos .....	9
2.2.3. Modelo electromagnético .....	11
2.2.4. Parámetros de CINDOOR usados en el trabajo .....	13
3. Caracterización electromagnética de materiales .....	16
3.1. Estudio de la conductividad y permitividad .....	16
3.2. Estudio de la atenuación .....	23
4. Caracterización del modelo geométrico .....	29
4.1. Modelos geométricos del laboratorio utilizados en el trabajo.....	29
4.2. Estudio realizado en la frecuencia de 3.5GHz.....	34
4.3. Estudio realizado en la frecuencia de 10GHz.....	35
4.4. Estudio variando la posición del receptor.....	37
5. Conclusiones y líneas futuras .....	42
6. Bibliografía.....	44

# 1. Introducción

Desde principios del siglo XXI, se han producido muchos cambios en la sociedad. Sobre todo, en uno de los temas que nos importa para la elaboración de este trabajo que son las comunicaciones móviles. Estas transformaciones han ido de la mano a la necesidad de acceder a todo tipo de información, es aquí donde el tema que nos atañe, las comunicaciones móviles e inalámbricas, han tenido un papel fundamental [2].

Actualmente debido a la fusión entre las tecnologías inalámbricas e internet, sumado al gran desarrollo de terminales móviles avanzados, ha dado como resultado la aparición en los últimos años de un número creciente de nuevas tecnologías para redes de banda ancha móvil (redes celulares), redes de área local inalámbrica (WLAN), redes de sensores inalámbricas (WSN), objetos inteligentes (RFID), redes heterogéneas...

Hay estudios que hablan de que en 2020 se espera que más del 70% de la población mundial tenga una suscripción a un operador móvil y esto seguirá aumentando.

A la vista de esta evolución, se puede decir que las tecnologías desplegadas actualmente como UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), HSPA+ (High Speed Packages Acces plus) o LTE (Long Term Evolution) no van a ser capaces de hacerle frente [2].

Por este motivo, diferentes organismos de investigación y estandarización llevan unos años desarrollando una nueva tecnología denominada quinta generación o 5G. Aun no se sabe cuándo será implementada definitivamente ya que aún está en desarrollo, por ejemplo, a finales de 2017 se aprobó “**las especificaciones de Nueva Radio 5G No Autónoma** (NSA 5G NR, o Non-Standalone 5G New Radio)”, convirtiéndose en el primer estándar de Quinta Generación (5G) de redes móviles aprobado oficialmente por el 3GPP (3rd Generation Partnership Project). A pesar de ser una tecnología aun en desarrollo ya hay algunos países que están realizando pruebas con ella y se quiere implementar para 2020, aunque para que llegue a todos los usuarios tendremos que esperar algo más [2].

La 5G es una tecnología novedosa que supondrá una revolución de las comunicaciones móviles, algunas de sus características [1] son:

- Tasa de datos de hasta 10GBps (entre 10 y 100 veces mejor que las redes 4G y 4.5G).
- Latencia de 1 milisegundo.
- Una banda ancha 1000 veces más rápida por unidad de área.
- Hasta 100 dispositivos más conectados por unidad de área (comparado con 4G LTE).
- Disponibilidad de la red del 99.99%
- Cobertura del 100%
- Reducción del 90% en el consumo de energía de la red.
- Estas redes usaran los estándares de seguridad HSM (Hardware Security Module), OTA (Over The Air) y KMS (Key Management Service).
- Junto con IPv6 las direcciones IP se asignarán según la red conectada y la posición geográfica.
- Hasta 10 años de duración de la batería en los dispositivos IoT (Internet of Things) de baja potencia.

El objetivo de esta tecnología es utilizar diferentes bandas del espectro [3]:

- Menores de 1 GHz
- Entre 1 y 6 GHz
- Entre 6 y 99 GHz

Esto será un punto clave en el desarrollo de este trabajo.

Es en este entorno donde nace la idea y la motivación necesaria para llevar a cabo este trabajo. Nuestro objetivo será realizar un estudio sobre el comportamiento de un software de caracterización de canal radio en la banda de 10 a 60 GHz.

Este software está validado para bajas frecuencias y debido a la 5G que todo encamina hacia una subida en frecuencia como hemos visto previamente, va a ser necesario poder hacer simulaciones fiables en frecuencias altas. Con este trabajo intentaremos demostrar que este software está capacitado para dicho trabajo.

De la misma forma justificamos el porqué de la banda de frecuencias entre 10 y 60 GHz, aun no se sabe en qué banda se va a ubicar la 5G, solo hay algunas especulaciones y algunas ideas, pero no está cerrado definitivamente, asique hemos decidido coger un rango bastante amplio, aunque más adelante veremos que el estudio le enfocamos finalmente en 3.5 y 10 GHz.

La estructura del trabajo se divide en 5 capítulos, 4 sin contar esta introducción.

El segundo capítulo se enfocará en explicar el software de caracterización de canal radio que se va a utilizar. Se explicará cómo funciona el software, los métodos de alta

frecuencia que utiliza, los algoritmos que aplica en las simulaciones, como lleva a cabo los estudios y las posibilidades que nos ofrece, hablaremos también de las ecuaciones matemáticas y de los conceptos físicos en los que está basado. Con este capítulo se pretende dejar constancia en el trabajo de toda la información necesaria para que se pueda entender posteriormente los diferentes estudios realizados. Además, al explicar el funcionamiento del software y las herramientas que nos ofrece será mucho más fácil para el lector poder seguir el trabajo de la forma más cómoda posible.

En el tercer capítulo vamos a llevar a cabo el estudio de los materiales más utilizados a la hora de modelar un determinado entorno, como pueden ser la madera, el vidrio, el hormigón, el pladur, el ladrillo, revestimientos de suelos y techos y otros materiales de construcción. La idea es enfocar el estudio en ver la evolución de algunos parámetros como son la conductividad y la permitividad en función de la frecuencia. Una vez tengamos estos datos podremos obtener los valores de la atenuación de los materiales estudiados. Para poder llevar a cabo este estudio nos apoyaremos en documentación de la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) y se elaboraran algunos programas para visualizar en gráficas los resultados y así poder evaluarlos mejor. En este capítulo ya podremos ir viendo si el software va a poder trabajar con frecuencias elevadas y podremos sacar algunas conclusiones al respecto, aunque no sean seguras del todo, ya que aun quedara hacer algunos estudios más.

El cuarto capítulo tratara de la caracterización del modelo geométrico, para este trabajo se ha decidido modelar un laboratorio del Departamento de Ingeniería de Comunicaciones de la Universidad de Cantabria. La idea es ir haciendo cada vez más complejo este modelo para poder ver hasta qué grado de detalle es necesario llegar a modelar para que la simulación sea lo suficiente precisa. También evaluaremos las simulaciones con diferentes contribuciones de rayos. Con estos dos estudios podremos delimitar tanto el mínimo como el máximo de contribuciones necesarias y también podremos ver cual es el grado de complejidad necesario de los modelos para que los valores obtenidos en las simulaciones sean correctos. Todo esto lo haremos tanto a 3.5 como a 10 GHz por lo que será otra comprobación más de que el software es capaz de trabajar a frecuencias altas. Primero se hará el estudio poniendo un transmisor y un receptor. Por último, colocaremos un mallado en torno al receptor para comprobar si la ubicación de este afecta a los resultados y de esta forma poder dar mayor validez a los resultados que hayamos obtenido previamente.

Finalmente, se añadirá un quinto capítulo en el que se expondrán las conclusiones a las que se ha llegado con los diferentes estudios realizados en el trabajo, también se dirán algunos puntos a los que se podría llegar partiendo de este trabajo y algunos estudios que han quedado sin hacer debido a que no estaban incluidos en los objetivos de este trabajo.

## 2. Simulación de sistemas de comunicaciones móviles

CINDOOR es un software desarrollado en el Departamento de Ingeniería de Comunicaciones (DICOM) de la Universidad de Cantabria, fue pensado como una herramienta de ayuda al diseño y posterior implementación de sistemas de comunicaciones móviles. Este programa nos ofrece una predicción de la cobertura, así como de las características del canal radio en entornos de interiores y en microcélulas urbanas.

CINDOOR se basa en un modelo específico del entorno. El modelo físico consiste en una aproximación de alta frecuencia de los fenómenos electromagnéticos que dan lugar a la propagación, en concreto se usa GO/UTD, que es una combinación de la Óptica Geométrica con la Teoría Uniforme de la Difracción. Partiendo de este modelo la unión entre las antenas transmisora y receptora se debe a la contribución de diferentes mecanismos de dispersión (scattering), estos “camino” quedan representados por rayos, de esta forma podemos hablar de acoplo mediante rayo directo, reflejado, difractado o combinaciones de ellos (rayos doblemente reflejados, reflejado-difractado, etc...). Como cada proceso mencionado lleva asociado un rayo, el cálculo y posterior trazado del rayo es una pieza clave para que el programa realice correctamente las predicciones y las simulaciones sean lo más precisas posibles [4].

El software CINDOOR ha sido una pieza clave a la hora de realizar este trabajo, gracias a él se ha llevado a cabo el estudio de la influencia de los materiales en la transmisión de las señales que usa esta nueva tecnología 5G. Al ser las frecuencias más altas, las señales se vuelven mucho más sensibles y se pueden ver afectadas por objetos pequeños que antes no era necesario tener en cuenta ya que era despreciable el efecto que producían, además como CINDOOR se creó para trabajar en frecuencias bajas, no se sabe con certeza si funcionara correctamente cuando subamos en frecuencia.

## 2.1. Óptica geométrica

La Óptica Geométrica (GO) se encarga de estudiar mediante leyes geométricas sencillas, los cambios de dirección que experimentan los rayos de luz en la reflexión y la refracción. Actualmente sigue siendo muy utilizada en el campo de la óptica y del electromagnetismo. A pesar de haber nacido antes de la aparición de las ecuaciones de Maxwell, con las ecuaciones de la GO se puede demostrar que constituyen una solución asintótica de las ecuaciones de Maxwell.

No debemos olvidar que la óptica geométrica se trata de una construcción matemática que se aproxima al comportamiento del rayo.

Los rayos son líneas rectas que indican, mediante una flecha, la dirección y sentido de propagación de la onda. Cuando se encuentra con un cambio de medio, cada rayo se refleja y se refracta según la ley de Snell.

El índice de refracción  $n$  de un medio viene dado por la siguiente expresión:

$$n = c/v \quad (2.1)$$

donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío y  $v$  la velocidad de la luz en el medio.

Debido a que la luz no viaja a la misma velocidad por todos los materiales puede causar dispersión, de esta forma el rayo no seguiría la misma trayectoria al salir.

Los ángulos de incidencia y de refracción entre dos medios y los índices de refracción están relacionados por la ley de Snell:

$$n_i \cdot \sin(\alpha_i) = n_r \cdot \sin(\alpha_r) \quad (2.2)$$

El otro fenómeno con el que trabaja la GO es la reflexión. Este fenómeno se da cuando los rayos chocan con una superficie en la que se puedan reflejar, la proporción entre los que chocan y los que salen expedidos está regulada por los ángulos de los rayos en relación con una línea perpendicular a la superficie en la que se reflejan. De esta forma la ley de la reflexión nos dice que el ángulo incidente es igual al ángulo reflejo, respecto a la perpendicular mencionada:

$$\theta_r = \theta_i \quad (2.3)$$

La segunda ley de la reflexión nos indica que el rayo incidente, el reflejado y la normal con respecto a la superficie reflejada están en el mismo plano.

A partir de las leyes mencionadas podemos prever el cambio en la dirección de los rayos y de esta forma ir trazando el camino entre transmisor y receptor.

## 2.2. Teoría Uniforme de la Difracción

La teoría geométrica de la difracción (GTD) es una extensión de la óptica geométrica para predecir el campo en una región de sombra causada por una cuña, ya que tiene en cuenta la difracción en aristas y vértices. Por otro lado, la geométrica de la difracción no puede aplicarse cerca de las regiones de transición.

Al igual que la óptica geométrica, la teoría de la difracción es una técnica de trazado de rayos.

Si en la superficie de un cuerpo eléctricamente grande existen discontinuidades, el campo scattering total se puede considerar como la suma de la contribución de su superficie y de las discontinuidades. La GTD proporciona la solución para el campo scattering de las discontinuidades, que se debe sumar a la de la GO para la superficie, uniendo los dos resultados obtendremos el campo total [8].

Cuando tenemos una superficie plana los rayos se reflejan siguiendo la ley de Snell que comentamos previamente, sin embargo, cuando hablamos de una cuña los rayos de difractan siguiendo el cono de Keller. Este cono tiene el vértice en el punto de dirección, el ángulo formado es igual que el generado por el rayo incidente y el vector tangente a la arista en el punto de difracción. Esto sería la generalización del principio de Fermat para el caso de una cuña. Los rayos difractados se propagan con una evolución de la amplitud y la fase análoga a la GO.

El principio de Fermat dice que “El trayecto seguido por la luz al propagarse de un punto a otro es tal que el tiempo empleado en recorrerlo es estacionario respecto a posibles variaciones de la trayectoria” dicho de una forma más simplificada “El trayecto seguido por la luz al propagarse de un punto a otro es tal que el tiempo empleado en recorrerlo es un mínimo”.

Existen algunas aplicaciones de este principio con las que se pueden deducir las leyes de la ya mencionada óptica geométrica.

Por ejemplo, sabemos que según la ley de la reflexión un rayo que se refleja en una superficie P, tiene un ángulo reflejado igual al ángulo incidente, además este ángulo esta medido respecto a una perpendicular imaginaria que nace en el punto de reflexión, asique si obtenemos la imagen del punto A (origen del rayo) sobre esta línea imaginaria, obtenemos el punto B (final del rayo) de esta forma podemos ver que el recorrido del rayo sería A-P-B, como sabemos que los rayos cuando viajan en el mismo medio tienen una trayectoria rectilínea, y que la distancia más corta entre dos puntos es la línea recta, podemos concluir que se cumple el principio de Fermat [10].

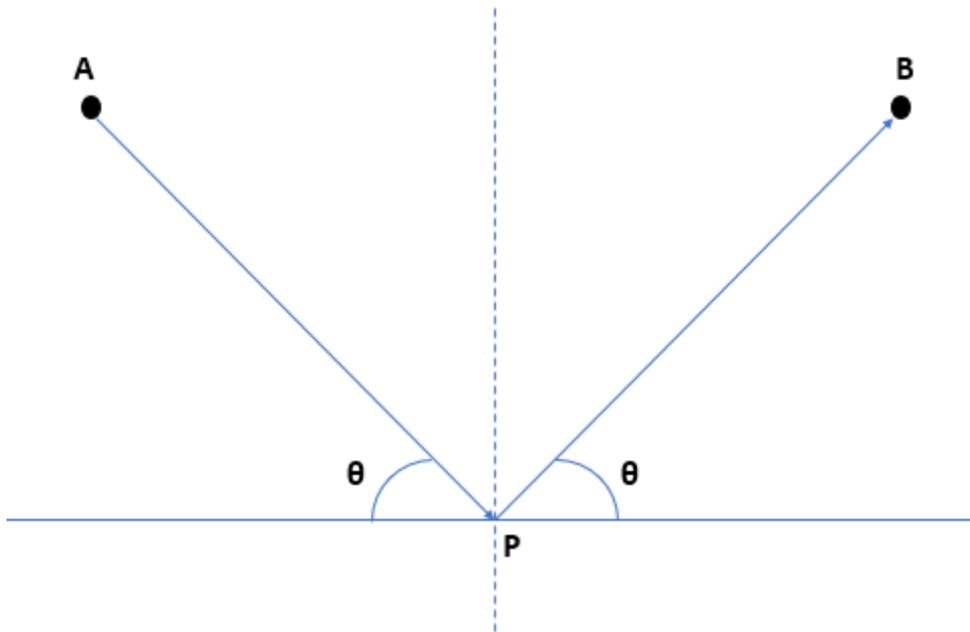


Figura 2.1.- Esquema de una reflexión.

De la misma forma podemos llevarnos esta situación a un caso en el que exista un cambio de medio, donde se produzca el fenómeno de la refracción. Es decir, si el rayo parte del punto A y va contra un cambio de medio (suponemos que la frontera es P) donde el índice de refracción varía, este trayecto será una línea recta entre A y P. El rayo se refracta y sale por el otro lado siguiendo otra línea recta hasta el punto B. De esta forma la trayectoria del rayo sería A-P-B, que sería el trayecto más corto entre A y B teniendo en cuenta el fenómeno de la refracción. Así queda demostrado que la ley de la refracción también cumple el principio de Fermat.

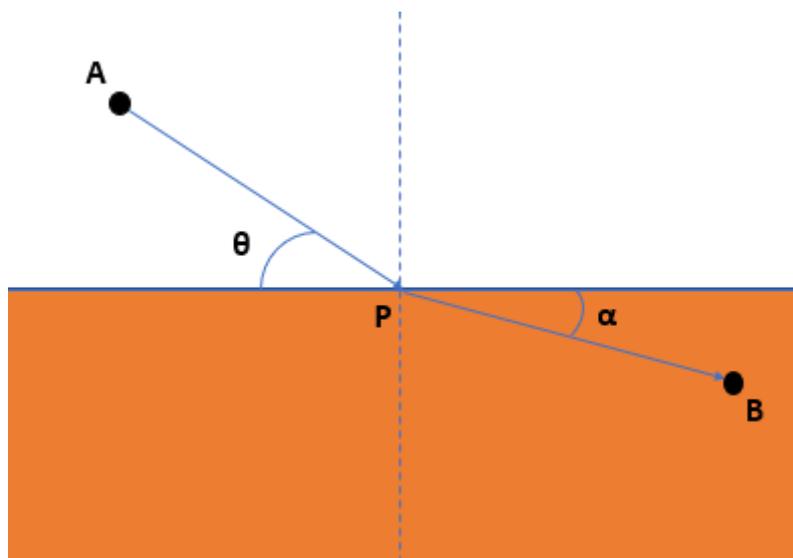


Figura 2.2.- Esquema de una refracción.

Al aplicar esta técnica, el principal problema al que nos enfrentamos es determinar los puntos de difracción, es decir, los puntos sobre la arista para los que alguna de las direcciones contenidas en su cono de Keller coincide con la dirección de observación. En caso de no encontrar un punto de difracción se considerará nula su aportación al campo de scattering.

Como ya mencionamos antes, esta técnica falla cuando evaluamos el campo en zonas próximas a las fronteras entre regiones iluminadas y de sombra, esto se debe a que los coeficientes de difracción tienen algunas singularidades. El campo que se debe a GO cae fuertemente a cero y el campo difractado se eleva a infinito. Estos fenómenos son debidos al tratamiento matemático de los métodos asintóticos en los que existe una región estrecha, donde las soluciones de las ecuaciones cambian rápidamente, esta zona es conocida como región de contorno. Keller baso su teoría original en expresiones validas fuera de estas regiones y de las zonas de sombra [10].

Esto era un problema asique se desarrolló la Teoría de Uniforme de la Difracción en la universidad de Ohio. La solución de esta teoría es multiplicar por un factor igual a cero los puntos en los que los coeficientes de Keller valen infinito, de esta forma los coeficientes de la UTD siempre son valores finitos. Cuando se trata de puntos lejanos al límite de sombra el factor que antes valía cero, ahora tiene un valor igual a la unidad, de esta forma los nuevos coeficientes son los mismos que los de Keller.

## **2.3. Estudios proporcionados por CINDOOR**

CINDOOR nos proporciona una serie de estudios, como pueden ser el mapa de cobertura, el trazado de rayos, respuesta impulsiva, estadísticas de desvanecimiento, ancho de banda de coherencia, potencias recibidas, etc... Para poder realizar todo esto podemos decir que CINDOOR se divide en cuatro partes: procesado geométrico, realización del trazado de rayos, cálculos electromagnéticos y procesado de la señal.

### **2.3.1. Procesado Geométrico**

Para cada entorno hay que tener un modelo físico específico, el cual debe ser lo más parecido a la realidad para que las simulaciones sean lo más precisas posibles, en función de la frecuencia a la que se vaya a trabajar hay que tener mayor o menor grado de detalle en estos modelos, ya que los objetos pequeños si trabajamos a frecuencias bajas se pueden considerar despreciables.

Estos modelos se podrían hacer con programas comerciales con los que se pueda diseñar el entorno, pero sería un costo computacional muy elevado, así que CINDOOR opta por trabajar con facetas planas y las aristas entre ellas, también conocido como modelo de facetas y aristas (facet-edge model). Con estas placas podremos modelar los muros, las calles, los tejados, muebles, etc... [4]

Para poder calcular el campo además del modelo geométrico nos hacen falta las características electromagnéticas del modelo, considerando sus parámetros principales: constante dieléctrica, conductividad, coeficiente de transmisión y rugosidad.

Este software trabaja con el formato DXF (Drawing Exchange Format), de esta forma cualquier modelo con esta extensión o compatible con ella, puede ser leído por CINDOOR.

CINDOOR realiza un proceso geométrico en el que se calcula la normal de las placas, se definen las aristas entre cada pareja de placas y por último se establece una ordenación entre placas que permita estudiar con facilidad las relaciones de visibilidad entre ellas, algo que es primordial a la hora del trazado de rayos. Esta ordenación se lleva a cabo con la aplicación del algoritmo BSP (Binary Space Partitioning). Este algoritmo es muy utilizado en el procesado y la animación de imágenes por ordenador. Concretamente en CINDOOR se utiliza para generar un árbol binario a partir de las placas de la escena, lo cual nos resulta útil para determinar que placas del modelo son atravesadas. Cada nodo del árbol es ocupado por una placa del modelo. El plano que pasa por cada placa divide el espacio total en dos mitades, de cada rama del modelo cuelgan las placas que están a un lado u otro del plano divisor [5].

### **2.3.2. Trazado de rayos**

Consiste en determinar los caminos de los rayos entre transmisor y receptor, como se dijo previamente determinar estos caminos es crucial para que las simulaciones sean válidas. No es una tarea fácil y el poder realizarlo de una forma eficiente determinara la rapidez y utilidad de un modelo específico. El número de caminos seria infinito pero su magnitud relativa va disminuyendo según aumenta el orden del efecto considerado. En CINDOOR podemos considerar rayo directo, reflejado y difractado hasta orden cinco, y también combinaciones reflejado-difractado o viceversa, estas últimas hasta orden dos [6].

En los algoritmos utilizados para el trazado de rayos se pueden diferenciar dos tipos: los basados en la teoría de imágenes y los de muestreo espacial (Shooting and bouncing).

En CINDOOR se ha decidido utilizar la teoría de imágenes porque parece más rigurosa y además es muy adecuada para el caso de geometrías modeladas por facetas planas. Esta teoría consiste en calcular la imagen del transmisor respecto a un de las placas, si esta imagen se une con el receptor con una línea recta y atraviesa la placa sobre la que se hizo la imagen, en ese punto habrá una reflexión, por lo tanto, la imagen del transmisor a través de cada placa es considerado un transmisor a todos los efectos, esto implica que la segunda reflexión se puede hacer con una segunda placa considerando como origen la imagen del transmisor, y así sucesivamente. Esto es un proceso exhaustivo y en principio parece lento, pero es algo recurrente por lo tanto la programación es muy eficiente. También existen una serie de criterios rápidos que se basan en productos

escalares entre vectores, con los que se pueden descartar rápidamente algunas placas que por su orientación relativa al transmisor y receptor no pueden en ningún caso tener una reflexión que llegue a su destino. Esta teoría también se aplica a los efectos como difracción-reflexión o viceversa [5].

En cuanto a los puntos de difracción, se realiza un estudio pesado sobre cada arista del modelo. Al igual que antes CINDOOR tiene algunos criterios que le permiten descartar de una forma rápida una arista donde no sea viable que se produzca una difracción. En las que, si se puede producir, se busca un punto que cumpla el principio de Fermat que se explicó más arriba, esto se realiza con unos cálculos simples.

Por último, quedaría evaluar la trayectoria de los rayos para ver si atraviesa alguna faceta del modelo, ya que, si esto se cumple, hay que aplicar un coeficiente de transmisión al campo asociado al rayo, para de esta forma tener en cuenta la pérdida de energía al atravesar un muro, una pared, etc... Este estudio se lleva a cabo utilizando el árbol BPS, del que hablamos previamente.

Podemos ver con esto que, a mayor número de placas, mayor será el tiempo de simulación.

A continuación, en la figura (2.3.), se adelanta la imagen del trazado de rayos del modelo 3 para la frecuencia de 3.5GHz, con el fin de mostrar como CINDOOR nos enseña gráficamente el calculo del trazado de rayos. Mas adelante se explicará en detalle los modelos utilizados y también explicaremos con mas detalle los resultados obtenidos.

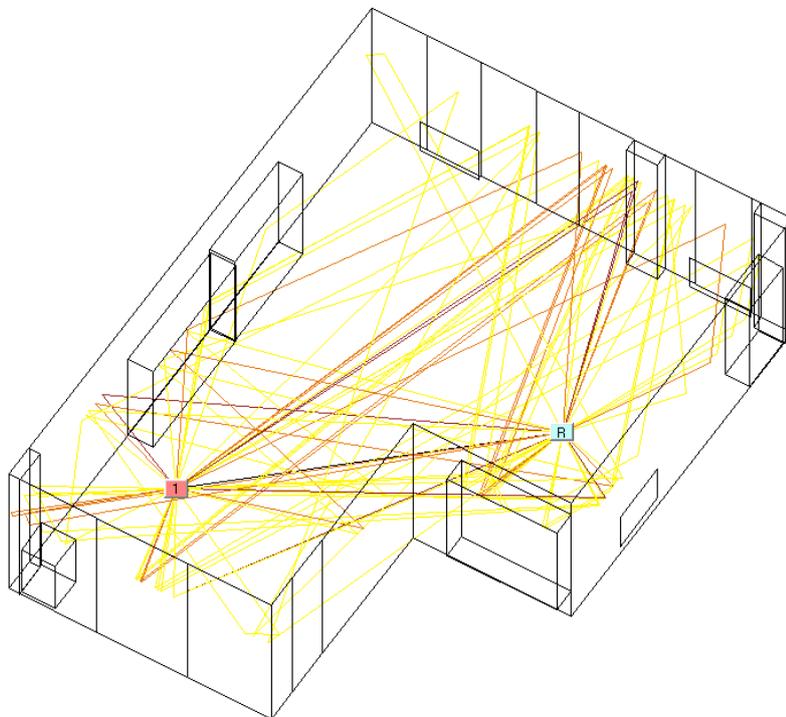


Figura 2.3.- Modelo 3 del laboratorio, con trazado de rayos de la primera (marrón), segunda (naranja) y tercera (amarillo) reflexión.

Un factor para tener en cuenta en el trazado de rayos es que el tiempo de simulación crece exponencialmente en función del número de reflexiones que se tengan en cuenta, en un modelo sencillo no se aprecia, pero si el modelo geométrico es algo complejo este tiempo de simulación se dispara cuando introducimos la cuarta y quinta reflexión. Más adelante veremos que esto nos ha obligado a omitir algunas simulaciones en el proyecto.

### 2.2.3. Modelo electromagnético

Como se mencionó más arriba para modelar la propagación se ha elegido una aproximación de alta frecuencia que consiste en combinar la Óptica Geométrica y la Teoría Geométrica de la Difracción.

De esta forma la propagación se puede modelar con rayos, cada uno con un frente de ondas, un valor vectorial de campo electromagnético y un término de fase.

Si conocemos el campo en un punto  $Q_i$  se puede calcular en otro  $Q_s$  utilizando la siguiente expresión:

$$\bar{E}(Q_s) = \bar{E}(Q_i) \cdot A(s) \cdot e^{-jks} \quad (2.4)$$

donde  $s$  es la distancia entre  $Q_i$  y  $Q_s$ ,  $e^{-jks}$  es la variación de fase entre esos puntos y  $A(s)$  es el término de amplitud de la pérdida de potencia de la señal al propagarse que depende del frente de ondas al rayo.

Si entre los puntos anteriores el rayo intercepta una placa del modelo geométrico el campo sufrirá una atenuación:

$$\bar{E}(Q_s) = \bar{E}(Q_i) \cdot \bar{T} \cdot A(s) \cdot e^{-jks} \quad (2.5)$$

donde  $\bar{T}$  es la matriz de transición que recoge las características electromagnéticas de la placa que ha sido interceptada, el ángulo de incidencia y la polarización.

En el caso de que el rayo sufra una reflexión debida a alguna placa del modelo, el campo  $Q_s$  se puede calcular a partir del valor del campo en el punto de reflexión  $Q_r$ :

$$\bar{E}(Q_s) = \bar{E}(Q_i) \cdot \bar{R} \cdot A'(s) \cdot e^{-jks} \quad (2.6)$$

donde  $\bar{R}$  es la matriz de reflexión, en la que se recogen todos los cambios de magnitud, fase y polarización que sufre el campo y  $A'(s)$  depende de la curvatura de la superficie (en superficie plana  $1/s$ ).

Las matrices de transmisión y reflexión ( $\bar{T}$  y  $\bar{R}$ ) se pueden escribir de forma simplificada como dos matrices 2x2, expresando el campo en el sistema de coordenadas asociado al rayo:

$$\bar{T} = \begin{pmatrix} T_{||} & 0 \\ 0 & T_{\perp} \end{pmatrix} \quad \bar{R} = \begin{pmatrix} R_{||} & 0 \\ 0 & R_{\perp} \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

donde  $T_{||}, T_{\perp}$  y  $R_{||}, R_{\perp}$  son los coeficientes de transmisión y reflexión para las componentes paralela y perpendicular al plano de incidencia.

Por último, si la unión transmisor-receptor se produce por un rayo difractado, la expresión que lo relaciona es:

$$\bar{E}(Q_s) = \bar{E}(Q_d) \cdot \bar{D} \cdot A''(s) \cdot e^{-jks} \quad (2.8)$$

donde  $Q_d$  es el punto de difracción y  $\bar{D}$  es la matriz de difracción, la cual relaciona los campos antes y después de que se produzca dicha difracción.

Si representamos la matriz de difracción cuando el campo incidente y difractado se expresan en el sistema de ejes asociados al rayo:

$$\bar{D} = \begin{pmatrix} D_s & 0 \\ 0 & D_h \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

La caracterización electromagnética de los materiales puede ser un problema ya que en la mayoría de los casos los objetos no están hechos de materiales puros y homogéneos, sino todo lo contrario, esto es un factor que influye en los cálculos haciendo que la simulación no sea del todo fiel a la realidad. Un ejemplo claro de esto pueden ser las paredes que por lo general no están hechas de un único material, se muestra un ejemplo a continuación:

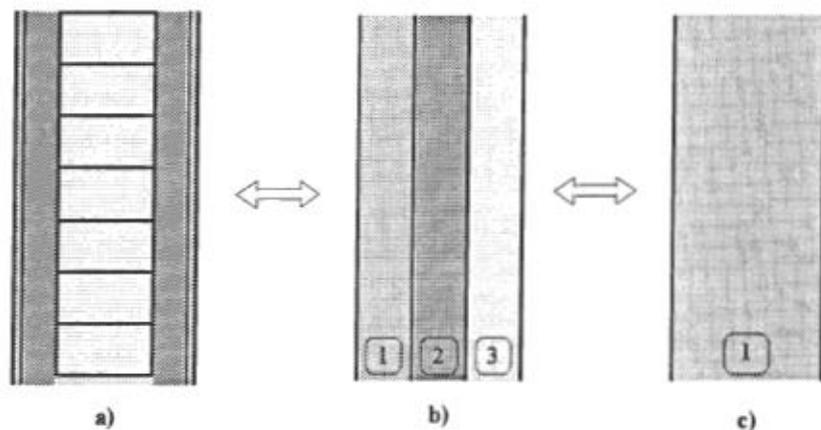


Figura 2.4.- a) Estructura no homogénea. b) Estructura con varias capas, donde cada una es un dieléctrico homogéneo. c) Estructura homogénea.

CINDOOR puede obtener los coeficientes de reflexión y transmisión tanto para la polarización vertical como horizontal, y las pérdidas producidas en cada una de las paredes formadas por varias capas. Para ello tenemos que darle los valores de cada capa como son: la constante dieléctrica, la conductividad y su espesor.

A continuación, se muestra una imagen de cómo podemos modificar los parámetros del modelo electromagnético a través de CINDOOR, como pueden ser la constante dieléctrica, la conductividad o las pérdidas de transmisión. En este caso es uno de los muros del laboratorio que se ha enseñado en la imagen 2.3. Es un muro de pladur asique se han puesto los valores de este material para la frecuencia de 3.5 GHz.

Electric properties input	
Relative dielectric constant	2.94
Electric conductivity	0.044 mhos/m
Stand. dev. of surf. roughness	0.00 m
<input type="checkbox"/> Compute transmission loss	
Transmission loss	2.5 dB

Figura 2.5.- Propiedades electricas de los materiales en CINDOOR.

#### 2.2.4. Parámetros de CINDOOR usados en el trabajo

Tras contar las bases del software con el que se ha desarrollado este trabajo, se explican los parámetros que se van a tratar más adelante: tao RMS, potencia media y atenuación, aunque de esta última hablaremos más adelante ya que no es algo que nos proporcione directamente el programa.

Una de las gráficas que nos proporciona CINDOOR es la respuesta impulsiva desde la cual se obtiene el perfil potencia retardo (Power Delay Profile, PDP), en caso de transmitir un pulso  $w(t)$  con una duración finita con el PDP obtendríamos la distribución de potencia a lo largo del tiempo.

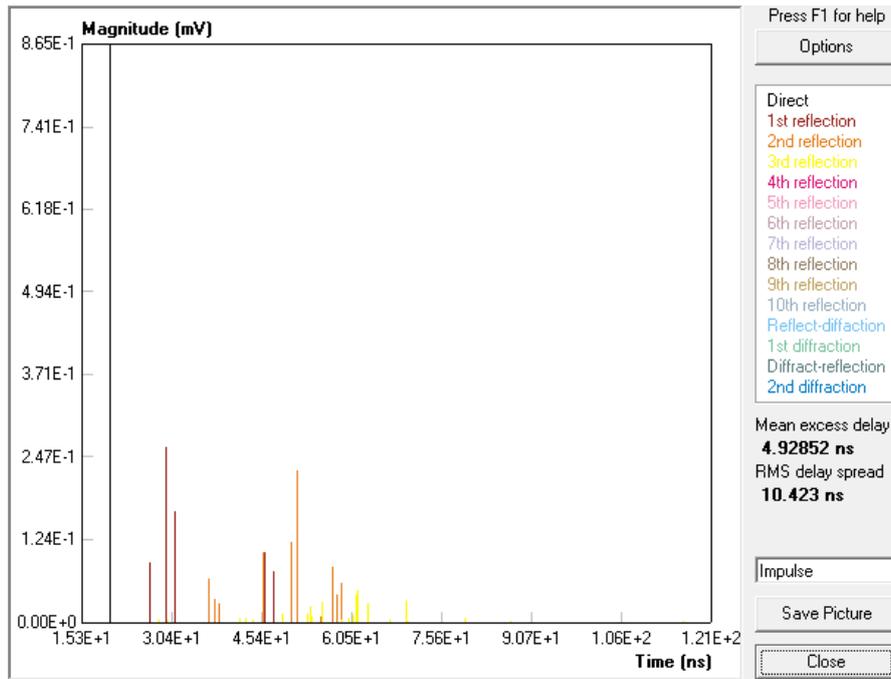


Figura 2.6.- Respuesta impulsiva del modelo 3 a la frecuencia de 3.5GHz, con aportaciones de rayo directo, primera, segunda y tercera reflexión.

Algunos parámetros de interés para predecir el comportamiento del canal como el retardo cuadrático medio (RMS Delay Spread,  $\tau_{rms}$ ) y el ancho de banda coherente, los podemos obtener de una forma relativamente sencilla a partir del perfil potencia retardo, figura 2.6.

En nuestro caso lo que más nos interesa es el  $\tau_{rms}$ , es una medida de la dispersión temporal de la señal que aproxima la máxima velocidad de información que puede soportar un canal.

$$\tau_{rms} = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} (t - t_m)^2 \cdot P_n(t) \cdot dt} \quad (2.10)$$

donde  $t_m$  es el retardo medio (Mean Excess Delay):

$$t_m = \int_{-\infty}^{+\infty} t \cdot P_n(t) \cdot dt \quad (2.11)$$

y  $P_n(t)$  es el PDP normalizado:

$$P_n(t) = \frac{P(t)}{\int_{-\infty}^{+\infty} P(t) \cdot dt} \quad (2.12)$$

Al realizar el trazado de rayos, CINDOOR nos calcula la potencia media recibida en el receptor, que es la media de la potencia recibida por cada rayo en este punto, no hace falta decir que es un parámetro fundamental para saber el nivel de señal que tendremos en el receptor. Con este valor nos podemos hacer una idea de si los objetos del modelo geométrico están causando un nivel de pérdidas que haga imposible la comunicación entre transmisor y receptor.

## **3. Caracterización electromagnética de materiales**

En este tercer capítulo vamos a proceder a realizar la caracterización electromagnética de los materiales, para ello primero realizaremos un estudio de la conductividad y la permitividad.

Para llevar a cabo este estudio recurriremos a documentación de la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones), de donde sacaremos las ecuaciones necesarias para poder realizar el estudio, así como algunas constantes que varían para cada material y seleccionaremos algunos de los materiales mas importantes a la hora de modelar un entorno.

Para hacer estos estudios se ha elegido una banda de frecuencia bastante amplia (concretamente haremos el estudio en la banda de 8 a 80 GHz).

Por otro lado, con ayuda de Matlab representaremos los resultados de la permitividad y la conductividad de los diferentes materiales para poder verlos con claridad.

Finalmente, y a la vista de los resultados se procederá a realizar un cálculo de la atenuación de los materiales mas relevantes. Nuevamente se representarán los resultados para mayor claridad.

### **3.1. Estudio de la conductividad y permitividad**

El primer estudio que realizar es la conductividad y permitividad de algunos materiales que suelen ser utilizados en los modelos geométricos, como: el vacío (aire), el hormigón, el ladrillo, el pladur, la madera, el vidrio, el metal, el aglomerado, revestimiento de techos y revestimiento de suelos.

Para esta caracterización hemos recurrido a la UIT-R P.2040-1(07/2015) “Efectos de los materiales y estructuras de construcción en la propagación de las ondas radioeléctricas por encima de unos 100 MHz” [9], donde hemos encontrado las ecuaciones y los parámetros necesarios para llevar a cabo los cálculos de la permitividad,  $\eta$ , y de la conductividad,  $\sigma$ .

$$\eta = a \cdot f^b$$

$$\sigma = c \cdot f^d$$
(3.1)

En estas ecuaciones la  $f$  es la frecuencia en GHz,  $\sigma$  se expresa en S/m y  $\eta$  es adimensional. Los valores  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  son parámetros que dependen del material y se muestran en la tabla siguiente:

Tipo de material	a	b	c	d
Vació (aire)	1	0	0	0
Hormigón	5.31	0	0.0326	0.8095
Ladrillo	3.75	0	0.038	0
Pladur	2.94	0	0.0116	0.7076
Madera	1.99	0	0.047	1.0718
Vidrio	6.27	0	0.0043	1.1925
Metal	1	0	$10^7$	0
Aglomerado	2.58	0	0.0217	0.78
Revestimiento de suelos	3.66	0	0.0044	1.3515
Revestimiento de techos	1.50	0	0.0005	1.1634

Tabla 3.1.- Constantes de los materiales según la UIT para las ecuaciones de la conductividad y permitividad (3.1).

Conocida esta información procedemos a realizar un programa de Matlab con el fin de obtener unas gráficas que nos ayuden a ver la evolución de la conductividad y permitividad, con la frecuencia y así poder analizar mejor los cambios que pueden sufrir los materiales al ir subiendo en frecuencia. El barrido en frecuencia elegido ha sido de 20 a 80 GHz con un paso de 0.5GHz.

A continuación, se muestran las gráficas que se han obtenido con este programa de Matlab, las imágenes tienen dos graficas cada una, la superior es la correspondiente a la permitividad y la inferior se corresponde a la conductividad.

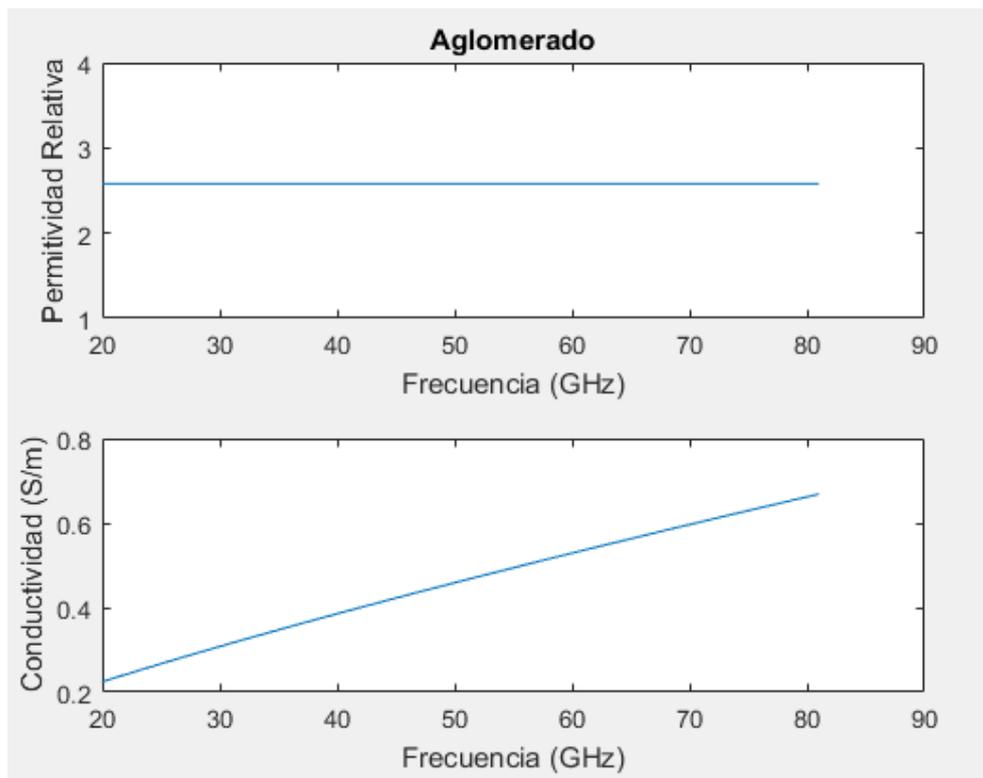


Figura 3.1.- Gráfica de la permitividad relativa y la conductividad del aglomerado en función de la frecuencia.

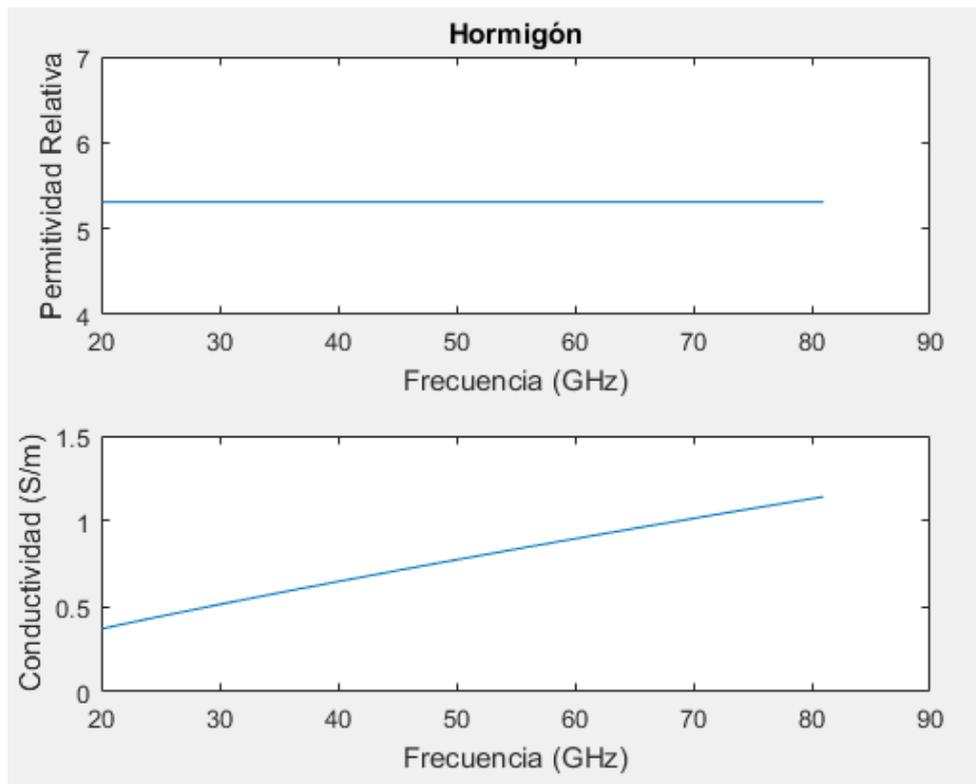


Figura 3.2.- Gráfica de la permitividad relativa y la conductividad del hormigón en función de la frecuencia.

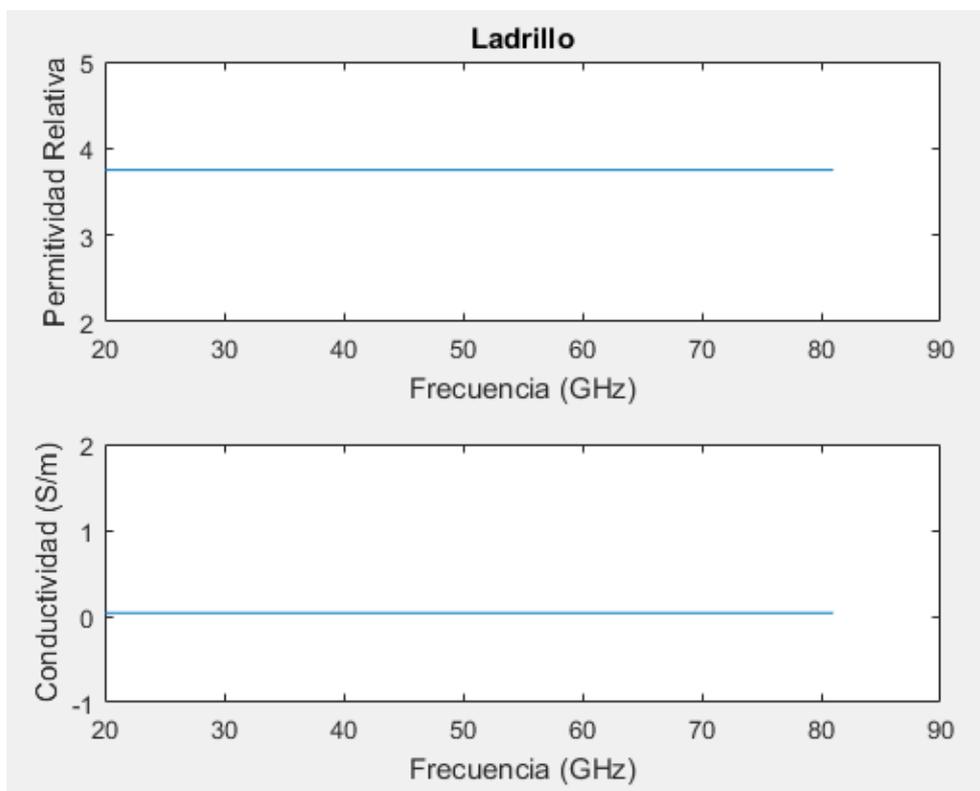


Figura 3.3.- Gráfica de la permitividad relativa y la conductividad del ladrillo en función de la frecuencia.

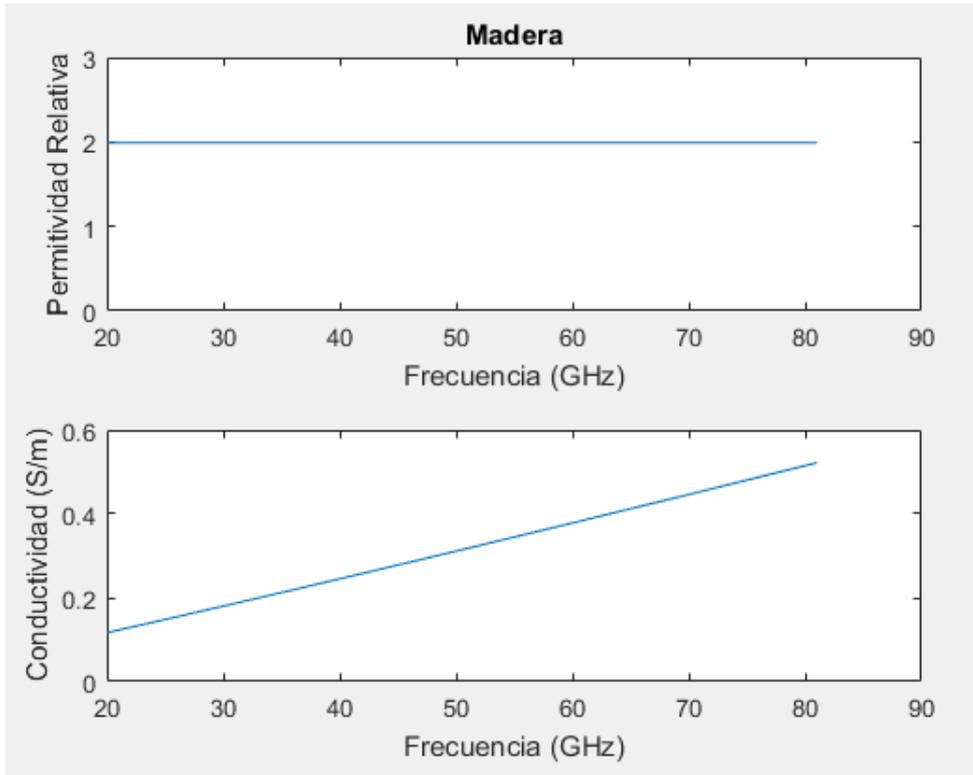


Figura 3.4.- Gráfica de la permitividad relativa y la conductividad de la madera en función de la frecuencia.

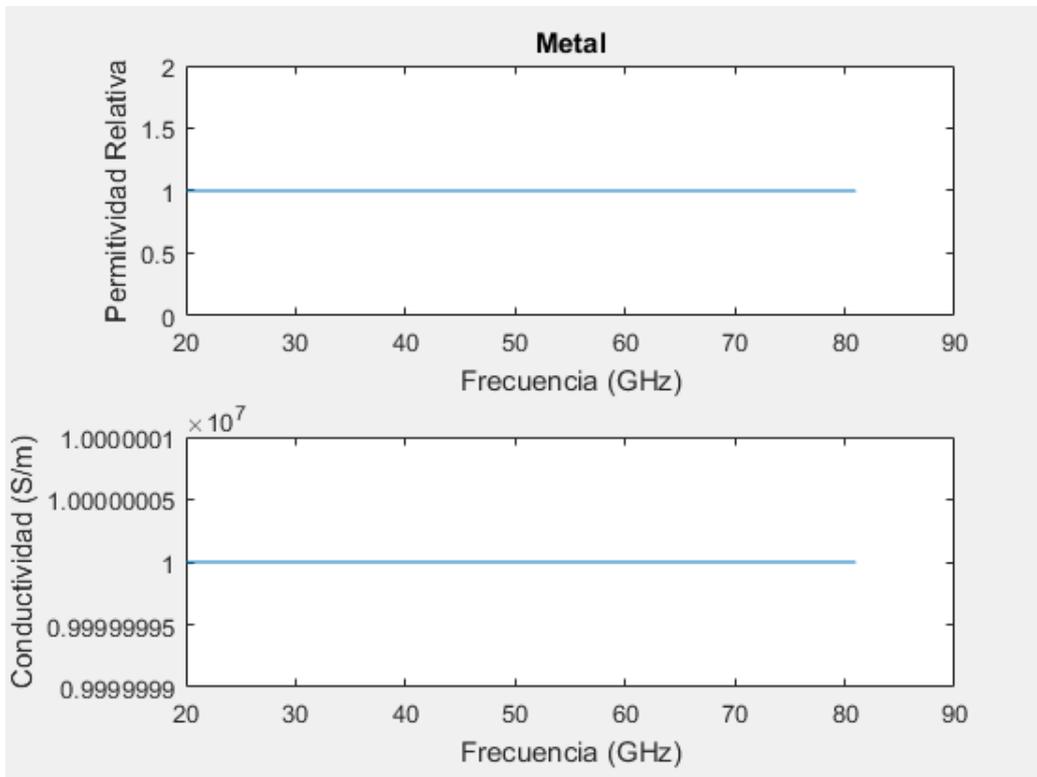


Figura 3.5.- Gráfica de la permitividad relativa y la conductividad del metal en función de la frecuencia.

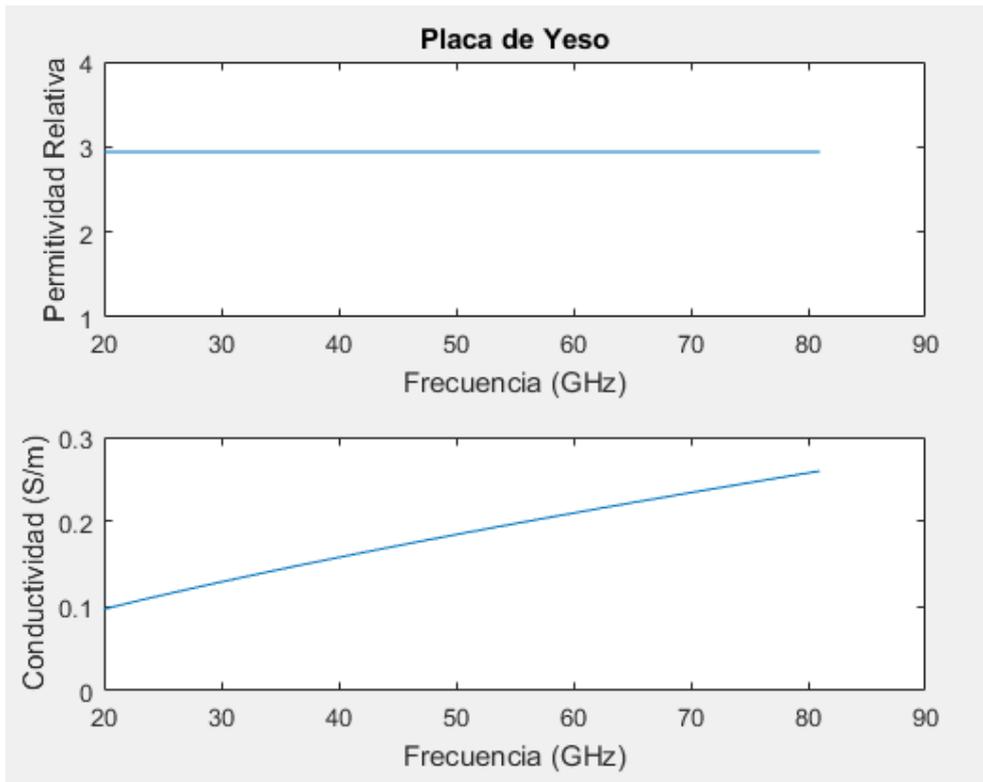


Figura 3.6.- Gráfica de la permitividad relativa y la conductividad del pladur en función de la frecuencia.

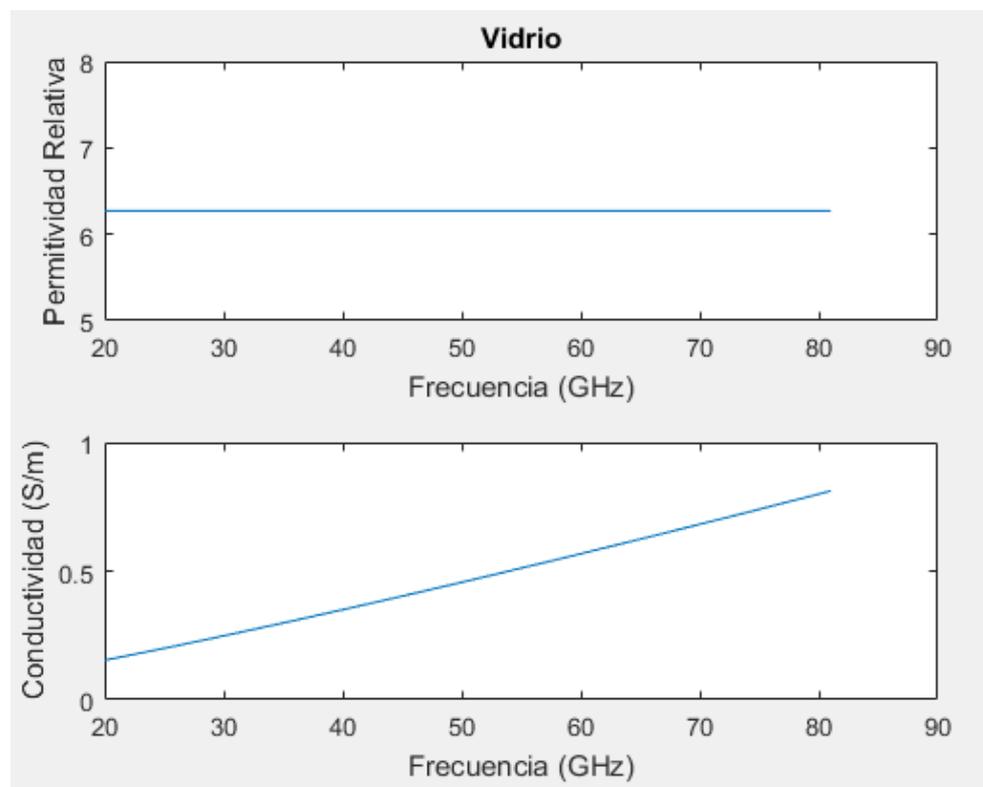


Figura 3.7.- Gráfica de la permitividad relativa y la conductividad del vidrio en función de la frecuencia.

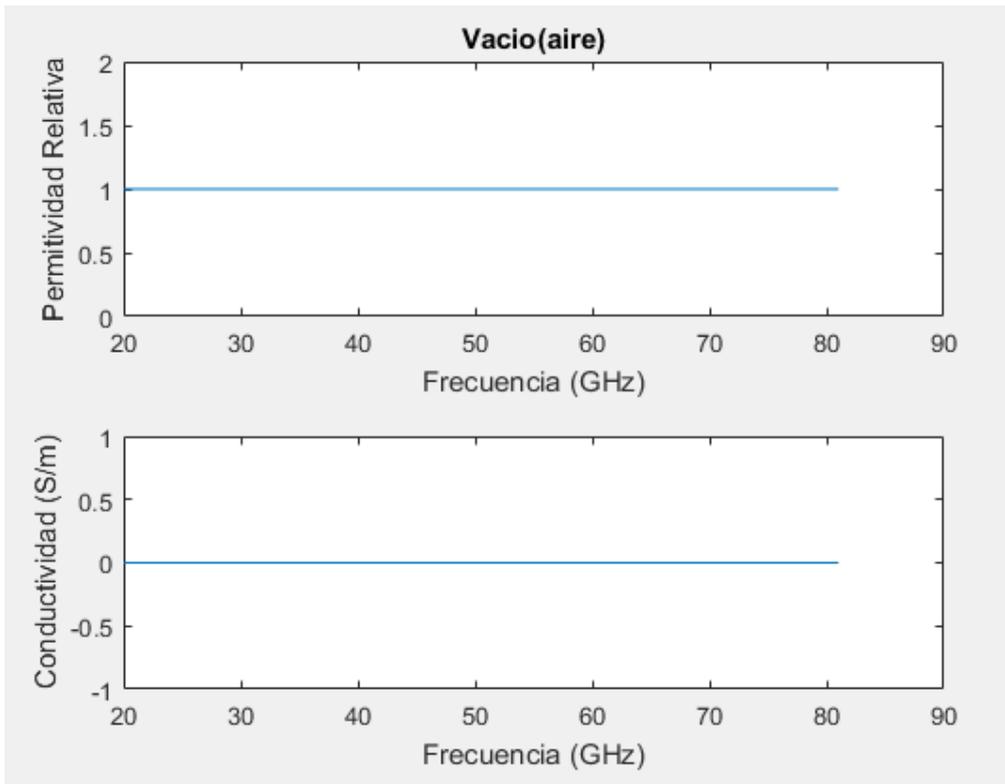


Figura 3.8.- Gráfica de la permitividad relativa y la conductividad del vacío en función de la frecuencia.

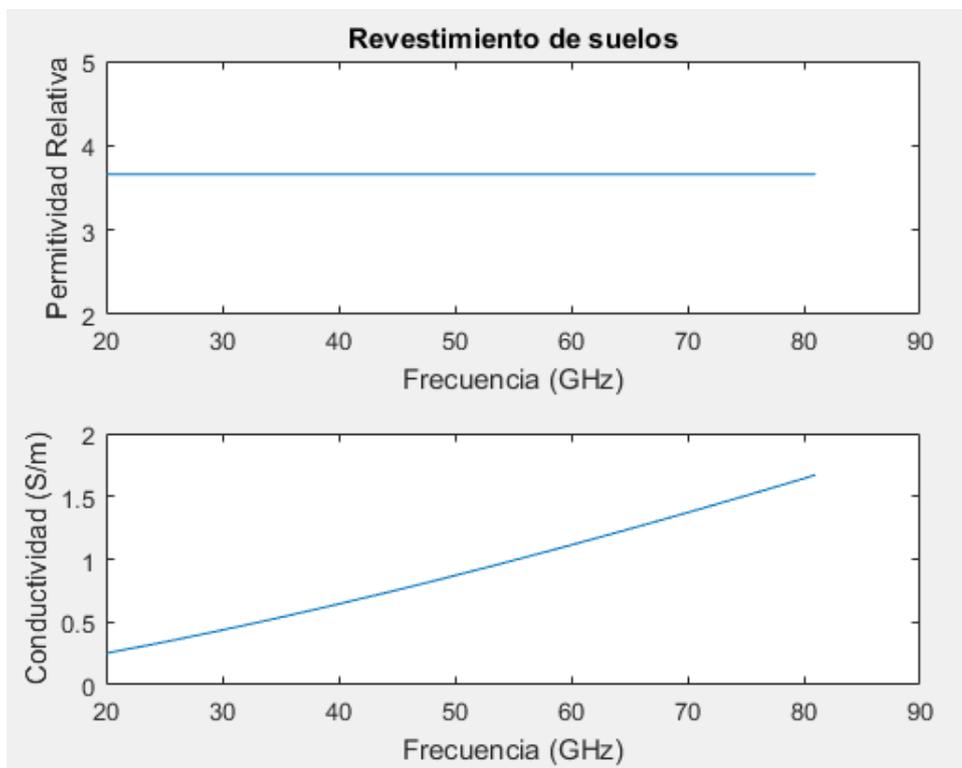


Figura 3.9.- Gráfica de la permitividad relativa y la conductividad del revestimiento de suelos en función de la frecuencia.

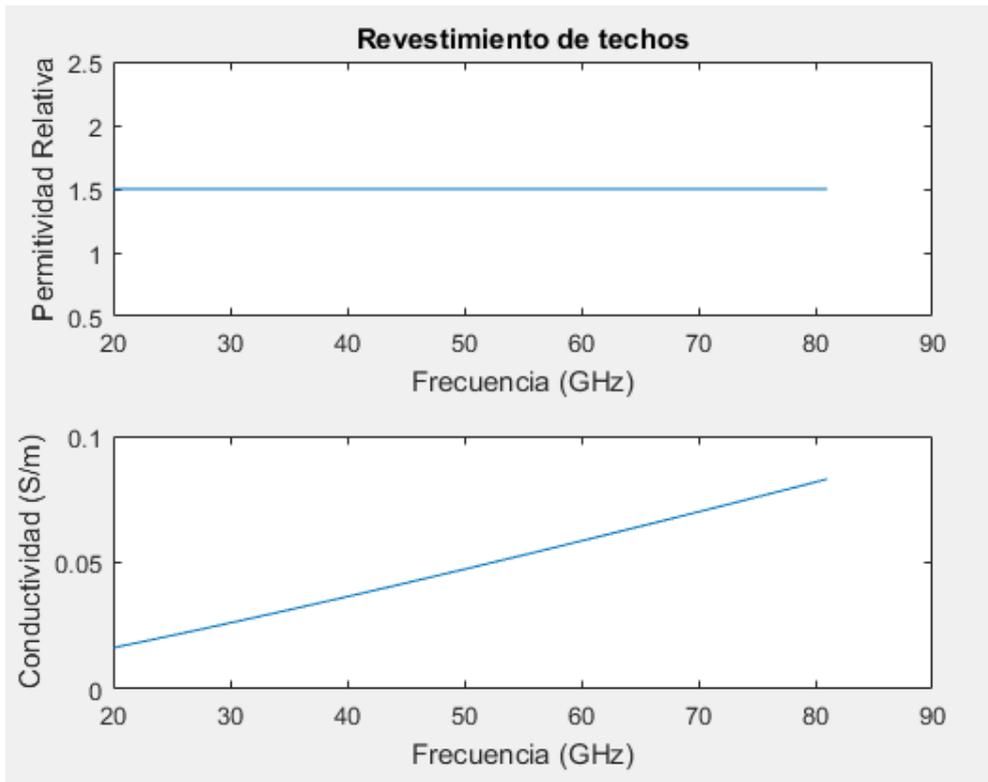


Figura 3.10.- Gráfica de la permitividad relativa y la conductividad del revestimiento de techos en función de la frecuencia.

Tras analizar los resultados tanto de la conductividad como de la permitividad y a la vista de las graficas podemos decir que tienen una tendencia lineal y muy suave, sin ningún tipo de salto brusco y sin anomalías. Por este motivo podemos concluir que CINDOOR a pesar de haber sido programado para trabajar a bajas frecuencias, fácilmente podríamos añadirle una base de datos o implementarle unas ecuaciones que aproximen estos resultados para que así pudiese trabajar a frecuencias más elevadas sin ningún tipo de problema.

### 3.2. Estudio de la atenuación

Tras este análisis se han hecho unas simulaciones con CINDOOR donde hemos colocado una placa entre el Tx (izquierda) y el Rx (derecha), como se muestra en la figura 3.11.

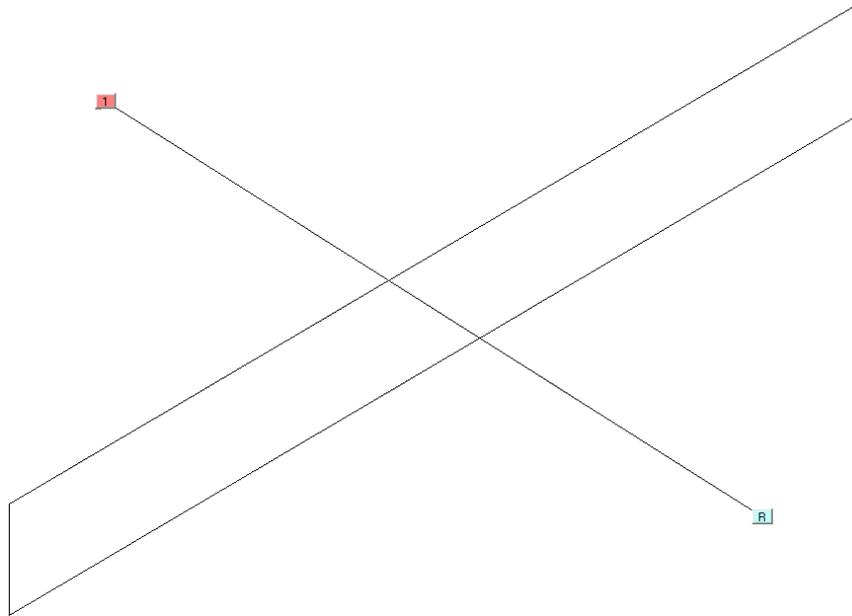


Figura 3.11.- Simulación de CINDOOR. Trazado de rayos (con la contribución del rayo directo) de una placa de pladur con un grosor de 2cm y a la frecuencia de 10GHz.

Estas simulaciones se han realizado con un dipolo elemental como antena transmisora con una potencia de 0.4444444 mw y otro dipolo elemental como antena receptora con una resistencia de radiación de  $73\Omega$ . Destacar que las antenas están colocadas a la misma distancia de la placa.

Se ha simulado este entorno para todas las frecuencias del rango indicado previamente y además se han hecho 3 simulaciones para cada una de ellas, donde se ha variado el grosor de la placa 1, 2 y 3cm.

Sacando de las simulaciones la potencia media y restando las pérdidas básicas de propagación, obtenemos la atenuación para cada frecuencia y para cada grosor tal y como está representado en las siguientes ecuaciones:

$$\lambda = \frac{c}{f(\text{GHz})} \quad (3.2)$$

$$Lb = 10 \cdot \log_{10} \left( \left( \frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot d} \right)^2 \right) \quad (3.3)$$

$$\text{Atenuación} = \text{Pot media} - Lb \quad (3.4)$$

Nuevamente representamos los resultados obtenidos en gráficas, para poder ver más claros los resultados. En estas graficas se muestra la atenuación (eje Y) frente a la

frecuencia (eje X) y para los tres grosores señalados previamente 1cm (rojo), 2cm (azul) y 3cm(verde).

Para la atenuación hemos decidido estudiarla entre los 8 y los 60 GHz, con un paso de 0.5GHz.

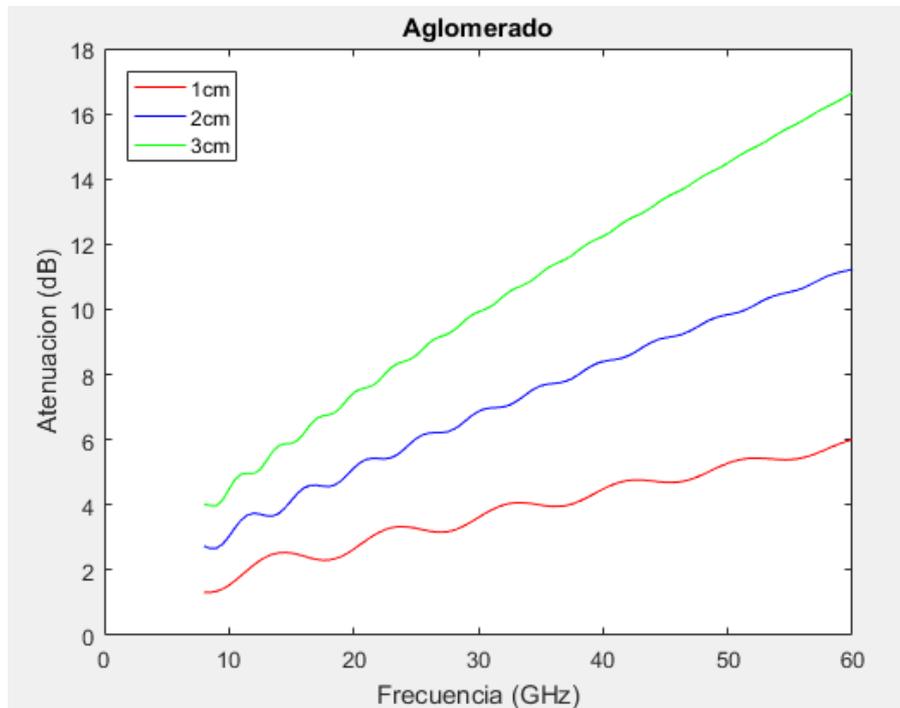


Figura 3.12.- Atenuación del aglomerado.

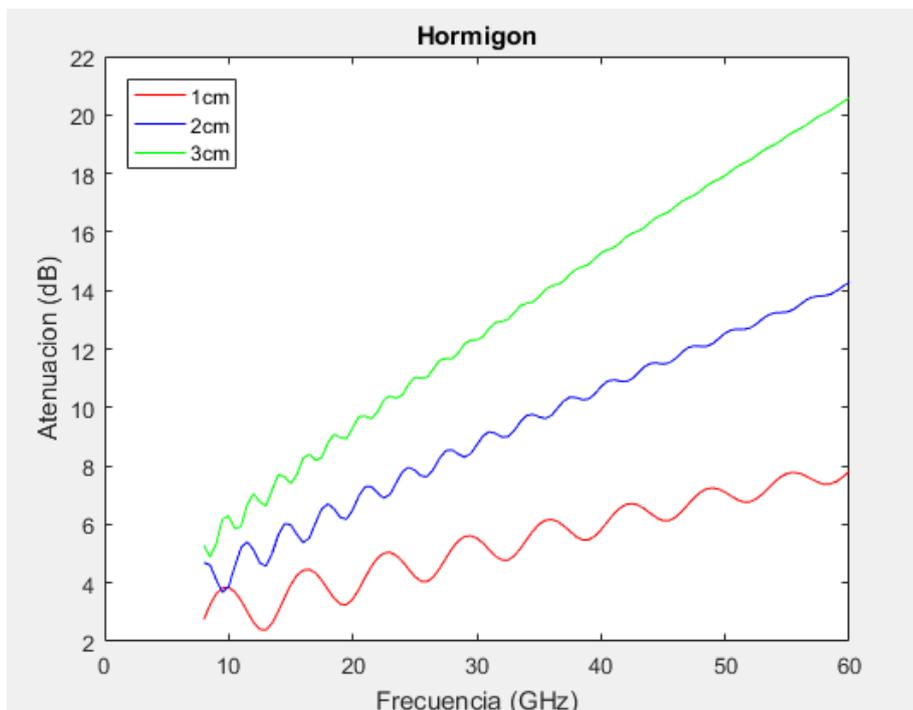


Figura 3.13.- Atenuación del hormigón.

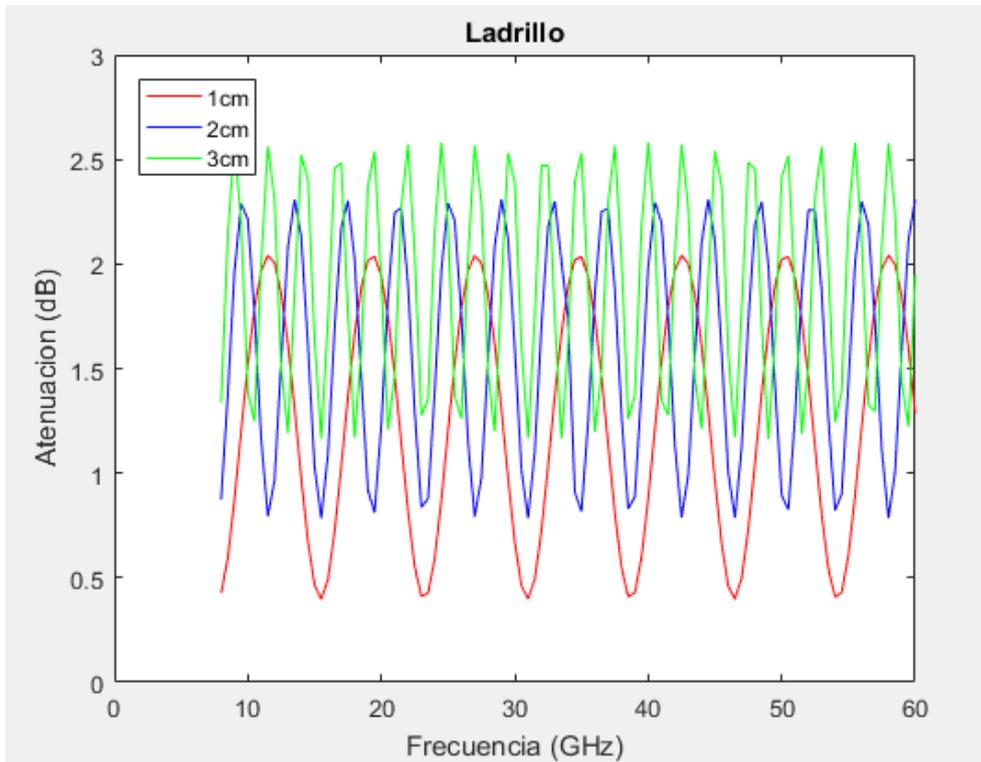


Figura 3.14.- Atenuación del ladrillo.

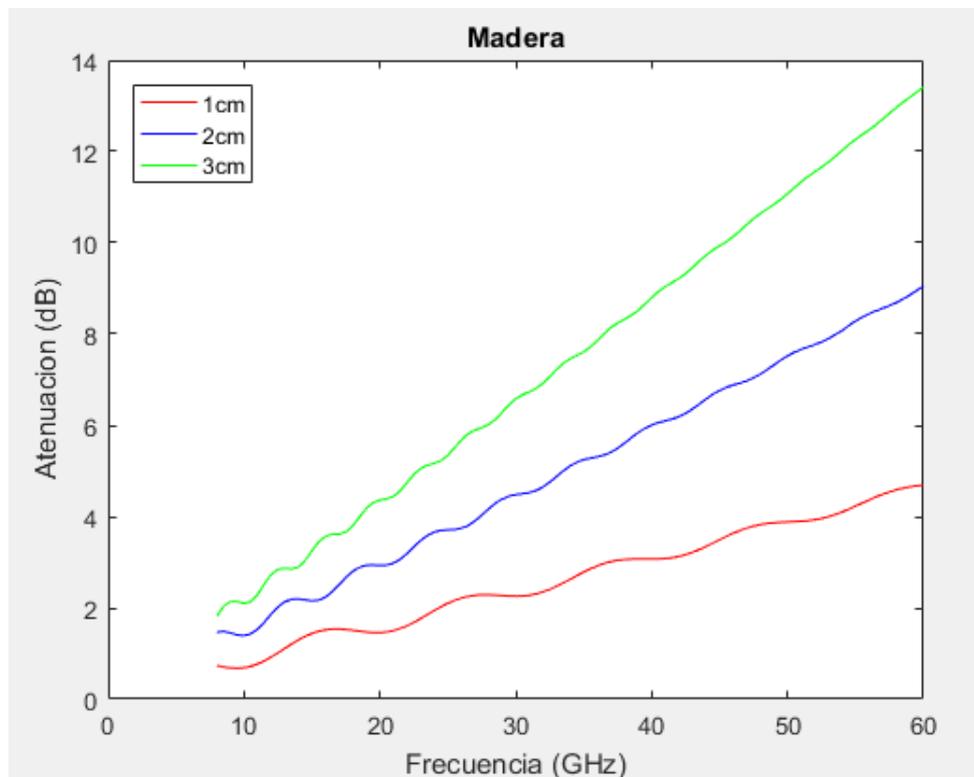


Figura 3.15.- Atenuación de la madera.

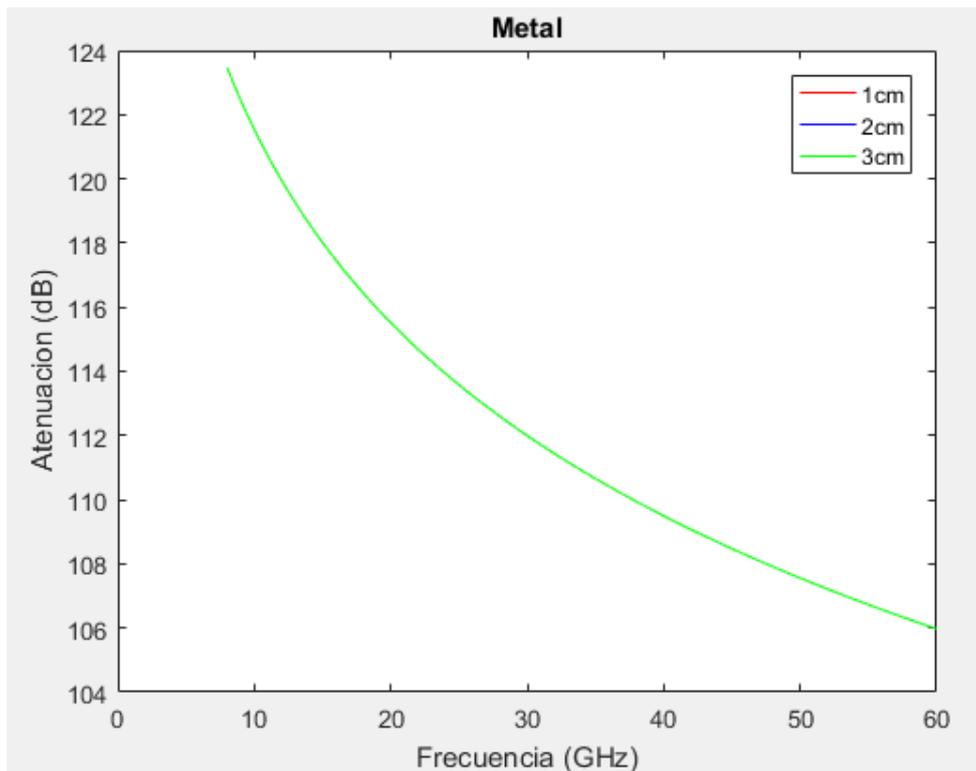


Figura 3.16.- Atenuación del metal.

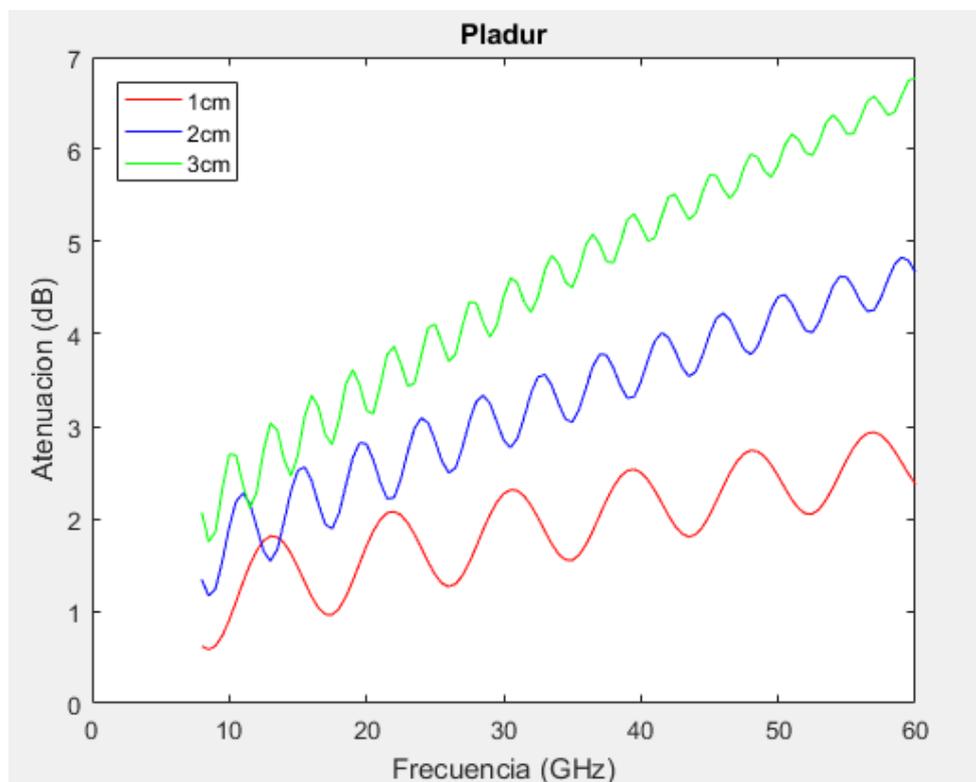


Figura 3.17.- Atenuación del pladur.

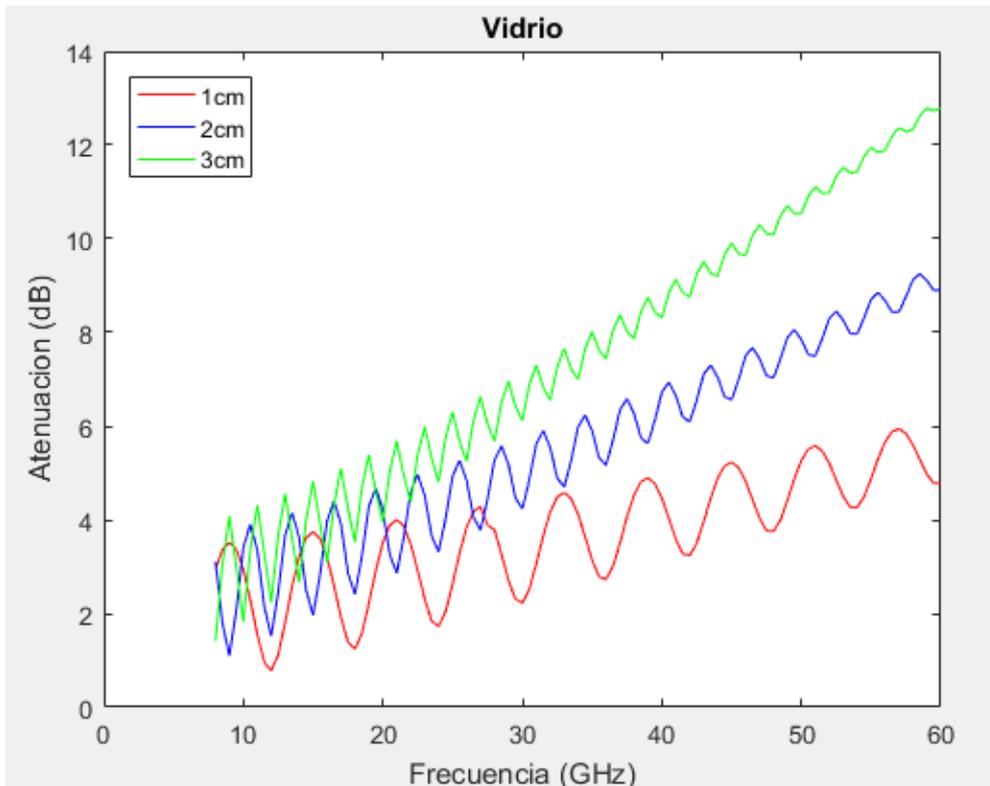


Figura 3.18.- Atenuación del vidrio.

A la vista de las gráficas se puede apreciar que la mayoría de los materiales tienen un perfil de atenuación sinusoidal que va creciendo con la frecuencia y que tiende a una recta, a pesar de tener un comportamiento sinusoidal se puede ver que las variaciones son pequeñas, por esta razón podríamos conseguir unas ecuaciones sencillas (una línea recta en algunos casos o una exponencial en otros) que nos aproximasen estos valores y así poder introducirlos a CINDOOR.

También podemos ver que la mayoría de ellos atenúan más cuanto mayor es el grosor, como era de esperar.

Salta a la vista algún comportamiento anómalo si lo comparamos con el resto. Estos casos son el del metal y el del ladrillo. En la gráfica del metal podemos ver una exponencial decreciente, pero esto es debido a que CINDOOR a partir de los 100 dB asigna ese valor, es decir, no considera valores más elevados. Por otro lado, en el caso del ladrillo vemos que la atenuación no crece con la frecuencia lo que nos da a entender que la atenuación de este material es constante a pesar de las variaciones de la frecuencia.

Estos valores de atenuación nos los puede ir calculando CINDOOR si le decimos la frecuencia y el grosor, pero es un proceso mucho más lento que si le introducimos nosotros directamente el valor de la atenuación. Por este motivo y viendo el comportamiento de los materiales sería relativamente sencillo implementar en CINDOOR estos valores de atenuación para las diferentes frecuencias y grosores.

## 4. Modelo geométrico del entorno

En este capítulo vamos a modelar un laboratorio del departamento de comunicaciones de la universidad con el objetivo de limitar hasta cierto punto un número de requisitos para que las simulaciones sean lo más eficientes y eficaces posible.

Por un lado, intentaremos establecer un mínimo y un máximo de reflexiones para tener en cuenta en el modelo y por otro lado trabajaremos con la complejidad del modelo geométrico para poder ver el grado de detalle mínimo para que las simulaciones sean precisas.

Estos dos factores son muy importantes. Si ponemos un número elevado de reflexiones y el modelo es sencillo no pasa nada, pero si el modelo es algo complicado como alguno de los que se han modelado en este trabajo, el tiempo de simulación es muy elevado, tanto que en algunos casos pierde el interés.

Para llevar a cabo estos estudios partiremos de un modelo sencillo en el que haremos las simulaciones añadiendo cada vez una aportación más (primera reflexión, segunda reflexión...), y se irá repitiendo el proceso para diferentes modelos en los que iremos aumentando la complejidad.

Primero se hará el estudio con un transmisor y un receptor, después de ver los resultados con el fin de afianzarlos haremos un mallado alrededor del receptor para ver si la posición del receptor puede variar algo y que los resultados sean igual de válidos.

### **4.1 Modelos geométricos del laboratorio utilizados en el trabajo**

El siguiente estudio consiste en ir introduciendo elementos cada vez más pequeños e ir simulando para poder ver hasta qué grado de detalle es necesario llegar de forma que la simulación sea eficiente. En principio vamos a recoger 3 valores: potencia media,  $\tau$  RMS y tiempo de simulación.

El modelo geométrico que vamos a utilizar es el del laboratorio del departamento de ingeniería de comunicaciones. Partiremos de un modelo en el que solo hay paredes, puertas y ventanas, e iremos introduciendo cada vez más y más elementos, como son las mesas, los armarios, los ordenadores, pizarra, extintores...

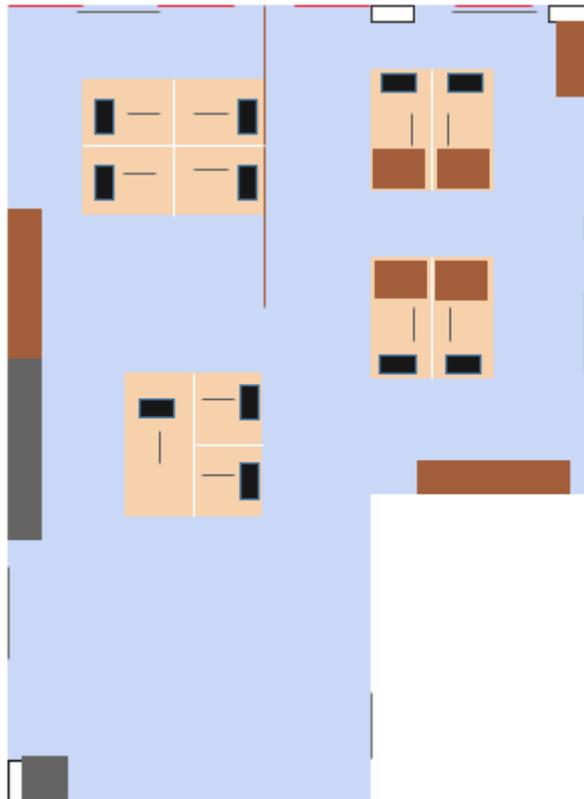


Figura 4.1.- Modelo final del laboratorio.

A continuación, se mostrarán los modelos que se han utilizado en este estudio. Respecto a dichos modelos hay que indicar que tanto las puertas como las ventanas se han supuesto continuas, es decir, van desde el suelo hasta el techo.

También indicar que en los modelos el transmisor esta representado con un cuadrado rojo y un uno en su interior (1) y el receptor es un cuadrado azul con una R dentro (R). Están colocados a 1.9 y 2 m del suelo respectivamente.

El primer modelo (24 placas) sería el más sencillo, en él solo están los muros, las ventanas, las columnas y puertas.

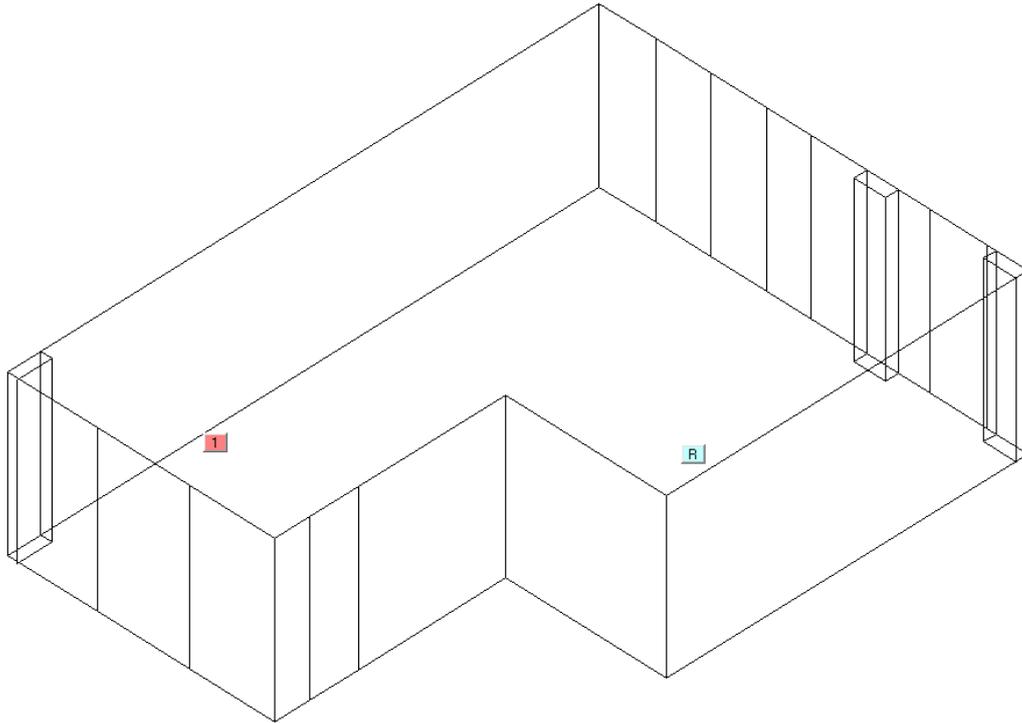


Figura 4.2.- Modelo 1 del laboratorio.

En el modelo 2 (27 placas) solo se han añadido los radiadores, los cuales se han colocado como si estuviesen pegados al suelo.

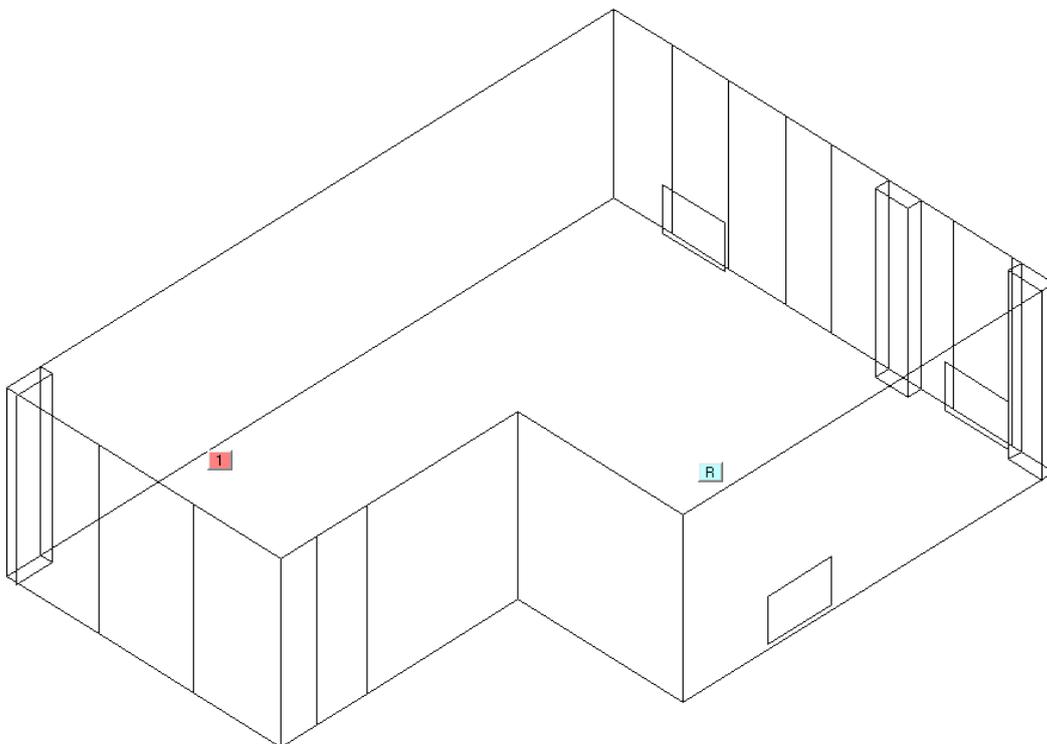


Figura 4.3.- Modelo 2 del laboratorio.

Para el modelo 3 (47 placas) se ha decidido introducir los armarios por ser los muebles más grandes del laboratorio, algunos de ellos son metálicos y otros son de madera, esto se ha tenido que tener en cuenta a la hora de modelar el laboratorio.

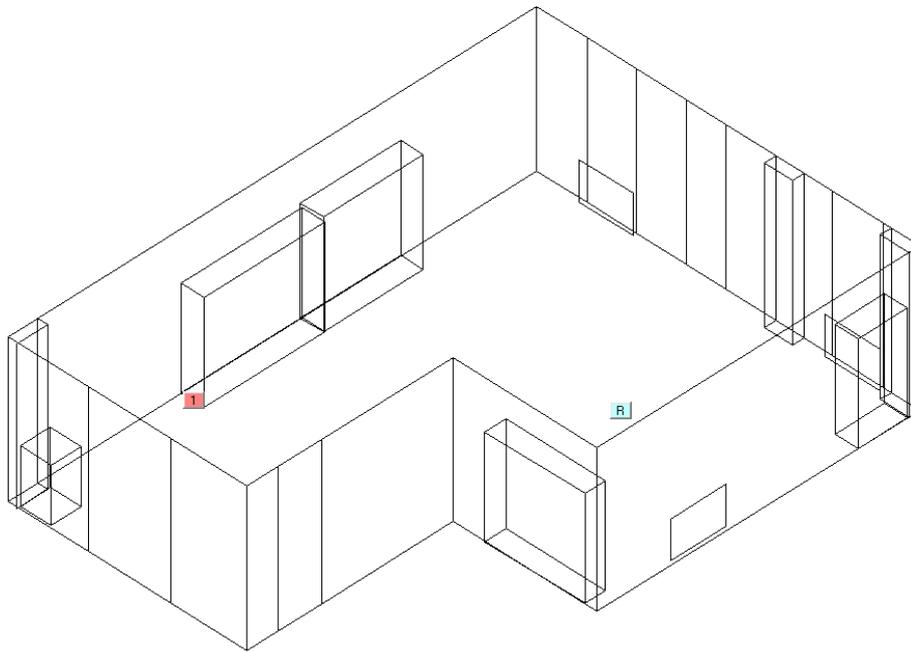


Figura 4.4.- Modelo 3 del laboratorio.

El modelo 4 (81 placas) ya empieza a ser más cuidadoso con los detalles y en las simulaciones hemos visto que el tiempo iba aumentando debido al número de placas. Se han introducido las mesas de madera, junto con una bandeja metálica ubicada debajo de estas, también hemos añadido una pizarra y una mampara de madera.

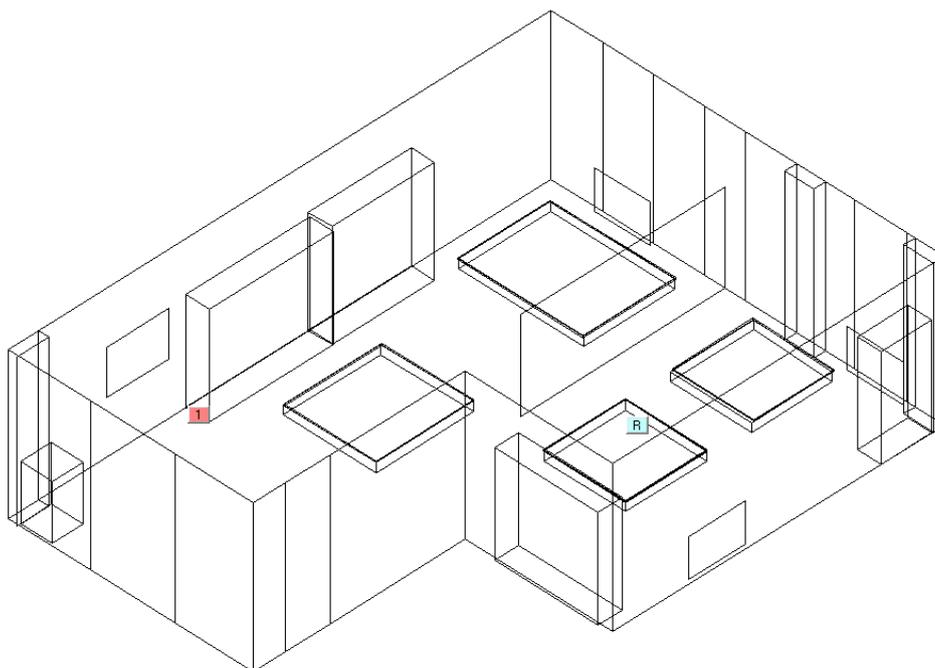


Figura 4.5.- Modelo 4 del laboratorio.



## 4.2. Estudio realizado en la frecuencia de 3.5 GHz

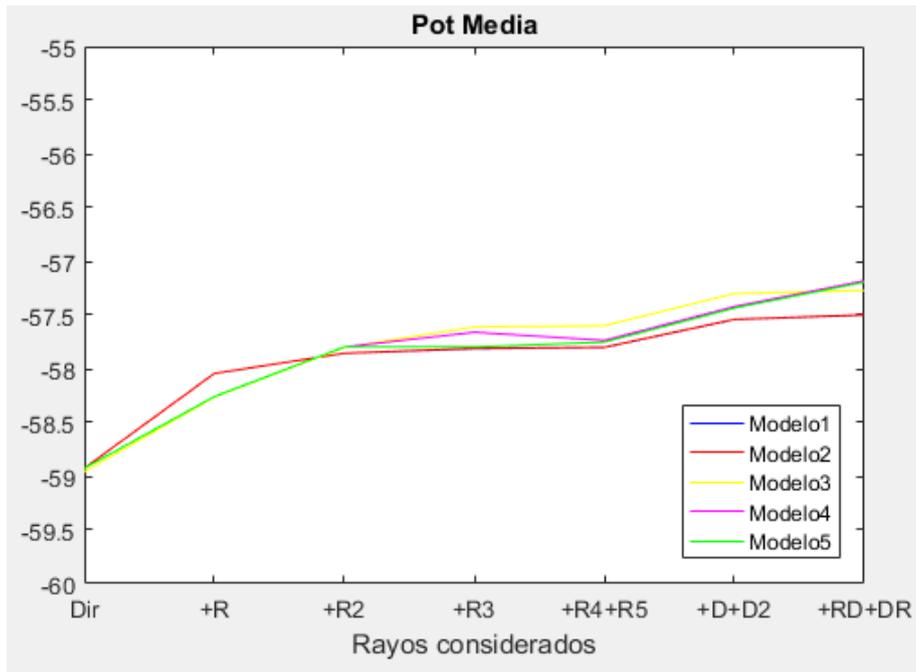


Figura 4.6.- Potencia media en los diferentes modelos, para la frecuencia de 3.5 GHz.

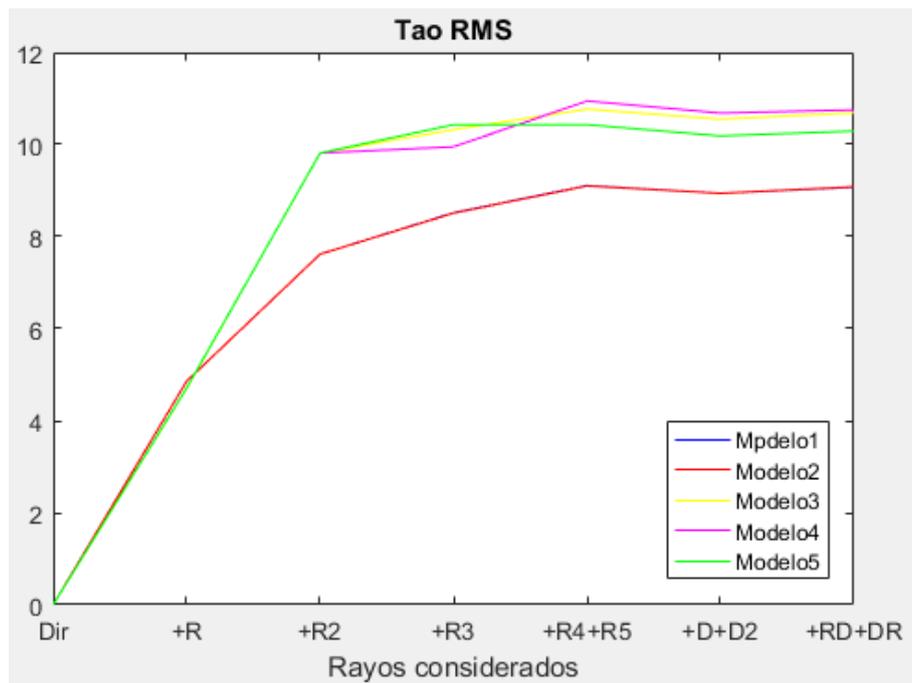


Figura 4.6.- Tao RMS en los diferentes modelos, para la frecuencia de 3.5 GHz.

Debido al elevado tiempo de simulación no hemos puesto la quinta reflexión para el modelo mas complejo, que seria el cinco. Aunque se han hecho las simulaciones con la cuarta reflexión.

Los rayos de las difracciones y de las combinaciones reflexión-difracción los hemos colocado al final de la gráfica ya que para este estudio no tienen mucha relevancia, aunque podíamos haberlos colocado entre la primera y la segunda reflexión para que las graficas quedasen un poco mas convergentes al final y haber visto de una forma algo mas clara los resultados. Pero esto tampoco es algo relevante.

Si nos fijamos en la gráfica de la potencia media podemos ver que en el momento que introducimos la tercera reflexión la potencia pasa a tener un valor mas o menos constante, es decir, que el hecho de añadir la cuarta y la quinta reflexión a la simulación no tiene una aportación lo suficientemente fuerte como para tener que incluirlas. De esta forma podemos concluir que a la frecuencia de 3.5 GHz, añadiendo solo hasta la tercera reflexión podemos obtener el valor de potencia media que nos puede aportar CINDOOR. Esto supone un ahorro importante en los tiempos de simulación.

Por otro lado, si nos fijamos en la otra gráfica, la del tao RMS, podemos ver que los dos modelos más simples (modelo 1 y modelo 2), se quedan un poco por debajo del valor que toman el resto de los modelos. El resto de los modelos tienden a tomar un valor aproximadamente de 10 ns. A la vista de esto podemos concluir que la complejidad de los modelos 1 y 2 no es suficiente para que la simulación nos aporte información útil, pero podemos ver que a partir del modelo 3 el valor es bastante similar en los tres sin importar que el modelo 5 tenga 100 placas más que el modelo 3.

Finalmente, llegamos a la conclusión de que en este caso con simular un modelo de complejidad media-baja (modelo 3) y teniendo en cuenta hasta la tercera reflexión ya obtendríamos valores bastante precisos.

### **4.3. Estudio realizado en la frecuencia de 10 GHz**

Hemos repetido el mismo procedimiento, pero ahora subiendo un poco más en frecuencia, hasta los 10 GHz. De esta forma podremos ver si CINDOOR trabaja bien para frecuencias elevadas y si el hecho de subir en frecuencia afecta a las conclusiones que hemos obtenido en el caso anterior cuando la frecuencia era 3.5 GHz.

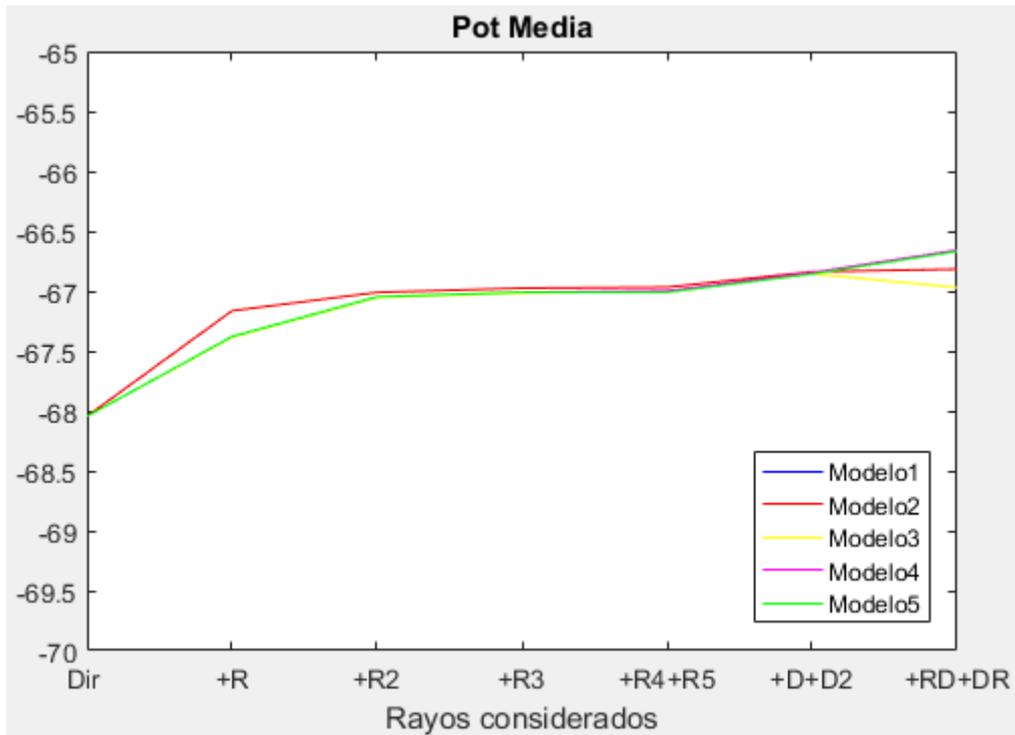


Figura 4.8.- Potencia media en los diferentes modelos, para la frecuencia de 10 GHz.

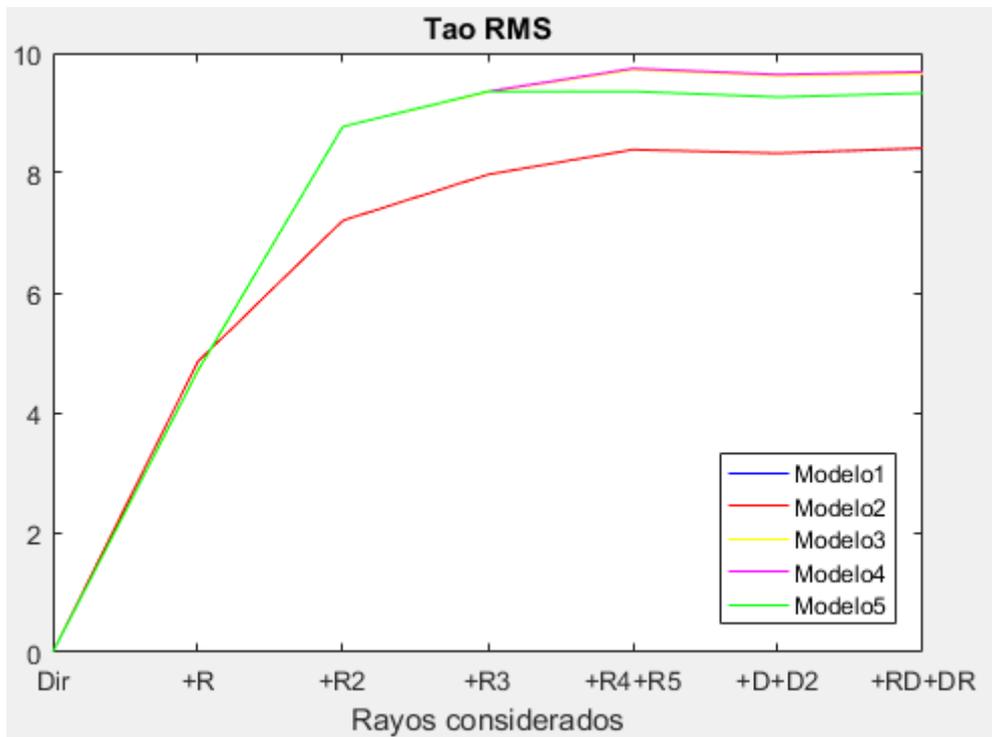


Figura 4.9.- Tao RMS en los diferentes modelos, para la frecuencia de 10 GHz.

Al igual que en el caso de 3.5 GHz debido al elevado tiempo de simulación no hemos puesto la quinta reflexión para el modelo más complejo, que sería el modelo cinco.

Si nos fijamos en la gráfica de la potencia media podemos ver que en el momento que introducimos la tercera reflexión (en este caso casi hasta con la segunda parece que sería suficiente) la potencia pasa a tener un valor más o menos constante, es decir, que el hecho de añadir la cuarta y la quinta reflexión a la simulación no tiene una aportación lo suficientemente fuerte como para tener que incluirlas. De esta forma podemos concluir que, a la frecuencia de 10 GHz, añadiendo solo hasta la tercera reflexión podemos obtener el valor de potencia media que nos puede aportar CINDOOR lo cual o supone un ahorro importante en los tiempos de simulación.

En este caso si nos fijamos en la otra gráfica, la del  $\tau_{\text{RMS}}$ , podemos ver que pasa lo mismo que antes, los dos modelos más simples (modelo 1 y modelo 2), se quedan un poco por debajo del valor que toman el resto de los modelos. El resto de los modelos tienden a tomar un valor aproximadamente de 9.8 ns. A la vista de esto podemos concluir que la complejidad de los modelos 1 y 2 no es suficiente para que la simulación nos aporte información útil, pero podemos ver que a partir del modelo 3 el valor es bastante similar en los tres modelos sin importar que el modelo 5 tenga 100 placas más que el modelo 3.

Igual que antes podemos llegar a la conclusión de que en este caso con simular un modelo de complejidad media-baja (modelo 3) y teniendo en cuenta hasta la tercera reflexión ya obtendríamos valores bastante precisos.

Al final el valor del tiempo no le hemos utilizado para nada ya que las simulaciones que contenían la quinta reflexión se disparaban y hacían que el resto de los tiempos fuese prácticamente despreciable.

### 4.3. Estudio variando la posición del receptor

Para afianzar los resultados obtenidos se ha decidido utilizar una función que tiene CINDOOR incorporada, que es la posibilidad de realizar una malla.

Con la malla lo que podemos hacer es crear alrededor de nuestro receptor una serie de puntos en los que se ira colocando el receptor. Para crearla en CINDOOR tenemos que decir el número de puntos que tiene por cada lado y añadir la separación entre puntos en lambdas, por eso hay que tener cuidado cuando se cambia de frecuencias ya que el valor también tenemos que modificarle según la siguiente expresión:

$$x = \frac{0.25}{\frac{c}{f}} (\lambda) \quad (4.1)$$

Donde  $c$  es la velocidad de la luz y  $f$  es la frecuencia.

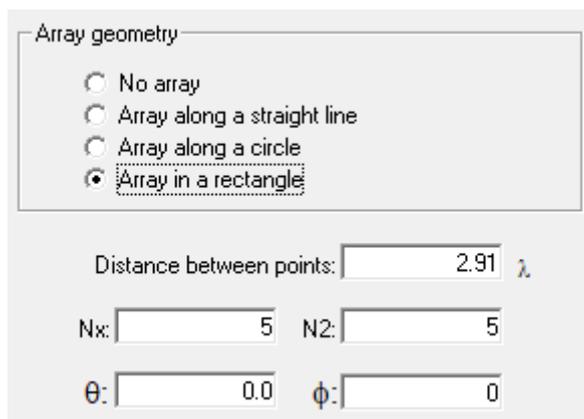


Figura 4.10.- Creación en CINDOOR del mallado 5x5 con separación de 0.25m, en la frecuencia de 3.5 GHz.

En nuestro caso hemos decidido realizar un mallado de 5x5, de esta forma se ha colocado el receptor en 25 posiciones diferentes, entorno al punto original como se puede ver en la imagen (4.10.). Es necesario destacar que, al ubicar el receptor en diferentes posiciones, tiene que realizar una simulación por cada una de ellas, de esta forma el tiempo de simulación se multiplica en nuestro caso por 25.

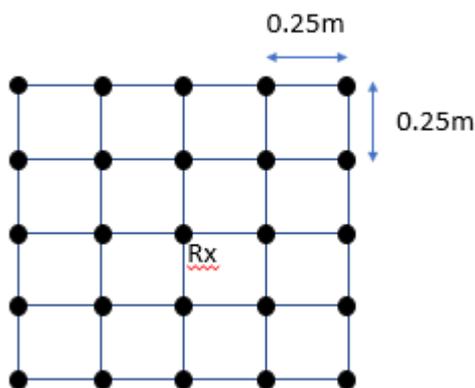


Figura 4.11.- Mallado usado en el receptor.

Al igual que antes, este proceso se ha aplicado tanto a 3.5 como a 10 GHz y a todos los modelos. Una vez obtenidos todos los resultados hemos ido analizándolos y haciendo la media para finalmente representarlos en graficas y así poder compararlos a los valores que obtuvimos en el apartado anterior.

Como es evidente en estas simulaciones tampoco se han tenido en cuenta las que incluyen la quinta reflexión ya que ahora tardan 25 veces más que antes.

Primero presentamos las gráficas de la potencia media y del tao RMS a 3.5 GHz:

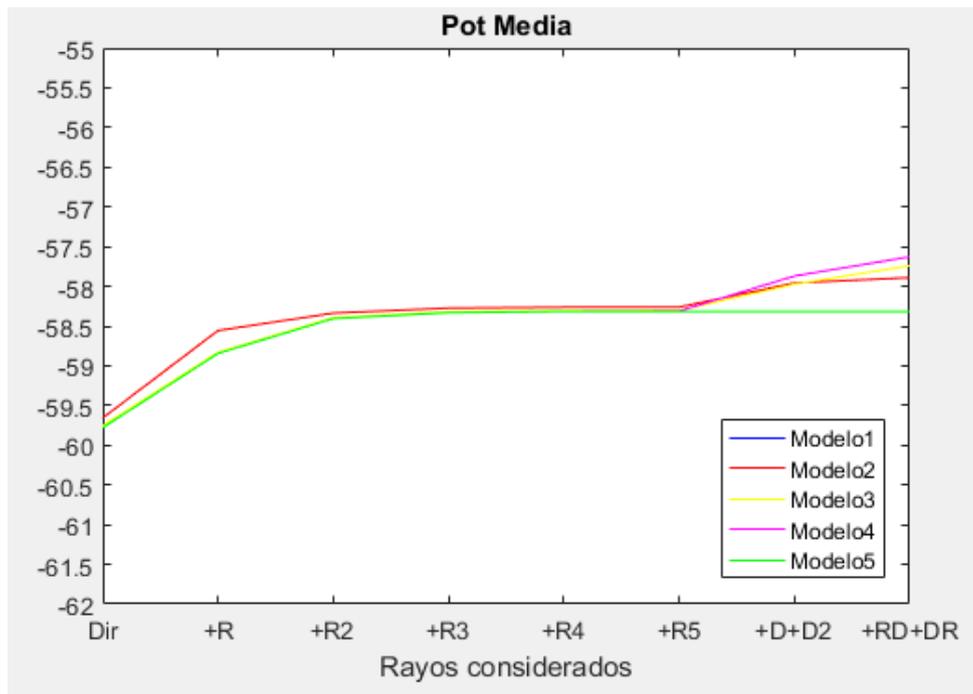


Figura 4.12.- Potencia media obtenida con el mallado en los diferentes modelos, para la frecuencia de 3.5 GHz.

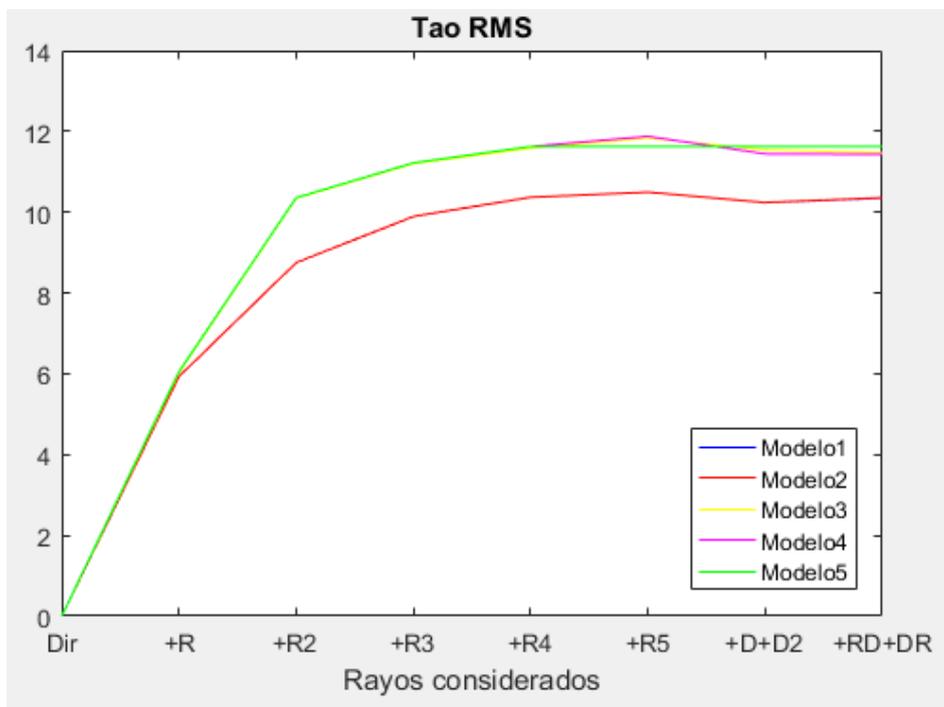


Figura 4.13.- Tao RMS obtenida con el mallado en los diferentes modelos, para la frecuencia de 3.5 GHz.

Si nos fijamos en estas graficas y las comparamos con las que obtuvimos en el apartado anterior podemos observar que los valores son algo diferentes ya que el receptor se ha movido de sitio y se ha hecho una media con los 25 valores obtenidos, pero la forma de la grafica es muy similar a la anterior, incluso en este caso podemos ver mejor lo que ya comentamos antes.

En la grafica de la potencia podemos ver que en el momento que introducimos la tercera reflexión (en este caso casi hasta con la segunda parece que sería suficiente) la potencia pasa a tener un valor más o menos constante, es decir, que el hecho de añadir la cuarta y la quinta reflexión a la simulación no tiene una aportación lo suficientemente fuerte como para tener que incluirlas. De esta forma podemos reafirmar que a la frecuencia de 3.5GHz, añadiendo solo hasta la tercera reflexión podemos obtener el valor de potencia media que nos puede aportar CINDOOR.

En la gráfica del tao RMS, podemos ver que pasa lo mismo que antes de tener la malla, los dos modelos más simples (modelo 1 y modelo 2), se quedan un poco por debajo del valor que toman el resto de los modelos. Estos otros modelos tienden a tomar un valor aproximadamente de 11 ns. A la vista de esto podemos reafirmar lo que ya dijimos es que la complejidad de los modelos 1 y 2 no es suficiente para que la simulación nos aporte información útil, pero podemos ver que a partir del modelo 3 el valor es bastante similar en los tres modelos sin importar que el modelo 5 tenga 100 placas más que el modelo 3, por lo tanto, podemos quedarnos con el modelo 3.

Por último, se muestran las gráficas de la potencia media y del tao RMS a 10 GHz:

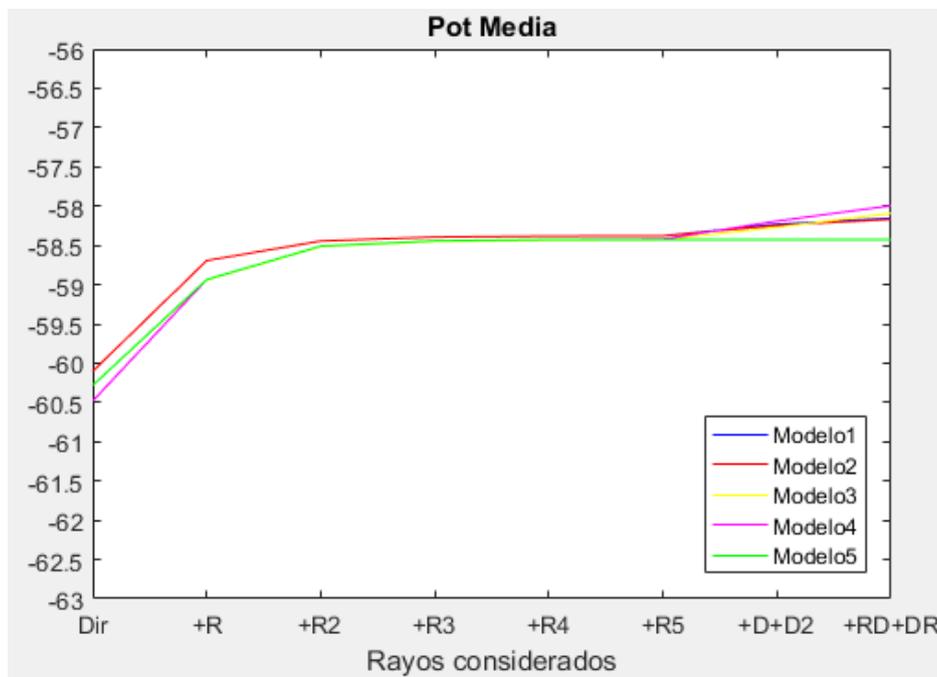


Figura 4.14.- Potencia media obtenida con el mallado en los diferentes modelos, para la frecuencia de 10 GHz.

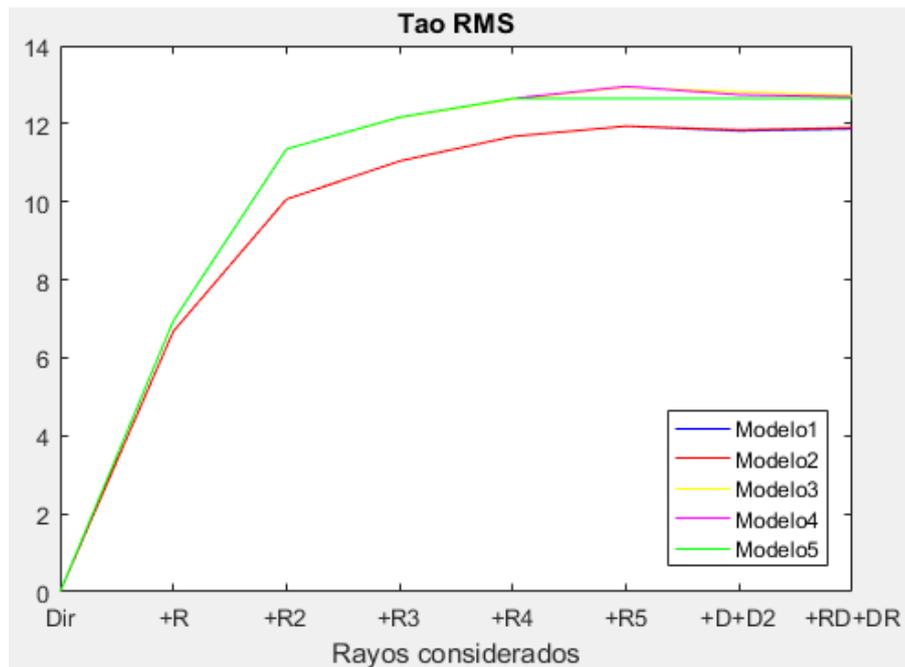


Figura 4.15.- Tao RMS obtenida con el mallado en los diferentes modelos, para la frecuencia de 10 GHz.

Mirando en la gráfica de la potencia media podemos ver que al introducir la tercera reflexión la potencia pasa a tener un valor más o menos constante, es decir, que el hecho de añadir la cuarta y la quinta reflexión a la simulación no tiene una aportación lo suficientemente fuerte como para tener que incluirlas. De esta forma podemos reafirmar lo que dijimos antes, que, a la frecuencia de 10 GHz, añadiendo solo hasta la tercera reflexión podemos obtener el valor de potencia media que nos puede aportar CINDOOR.

Por otro lado, si nos fijamos en la otra gráfica, la del tao RMS, podemos ver que los dos modelos más simples (modelo 1 y modelo 2), se quedan un poco por debajo del valor que toman el resto de los modelos. El resto de los modelos tienden a tomar un valor aproximadamente de 12 ns. A la vista de esto podemos volver a decir que a la frecuencia de 10GHz la complejidad de los modelos 1 y 2 no es suficiente para que la simulación nos aporte información útil, pero podemos ver que a partir del modelo 3 el valor es bastante similar en los tres modelos sin importar la complejidad de estos.

A la vista de los resultados obtenidos en este apartado podemos concluir que la posición del receptor puede variar algo con la posición real y aun así las simulaciones seguirían teniendo validez.

Por otro lado, se han reforzado las conclusiones y los resultados que habíamos presentado en el apartado anterior.

## 5. Conclusiones y líneas futuras

En el primer capítulo hemos hablado de los motivos que nos han llevado a realizar este trabajo, así como la situación actual en el entorno de las comunicaciones móviles y por último hemos hablado de los objetivos buscados con este trabajo.

El segundo capítulo se ha usado para explicar el software de caracterización de canal radio que se ha utilizado. Hemos explicado cómo funciona el software, los métodos de alta frecuencia que utiliza, los algoritmos que aplica en las simulaciones, como lleva a cabo los estudios y las posibilidades que nos ofrece, hemos hablado también de las ecuaciones matemáticas y de los conceptos físicos en los que está basado.

En el tercer capítulo se ha llevado a cabo el estudio de los materiales más utilizados a la hora de modelar un determinado entorno, como pueden ser la madera, el vidrio, el hormigón y otros materiales de construcción. El estudio se ha enfocado en ver la variación de la conductividad y de la permitividad en función de la frecuencia para después obtener los valores de la atenuación de estos materiales.

En este capítulo se concluyó que el comportamiento de la conductividad, la permitividad y la atenuación de los materiales es muy suave y fácil de aproximar mediante ecuaciones sencillas. De esta forma se podría llegar a implementar en CINDOOR ya sea con una base de datos o introduciendo unas ecuaciones que lo calculen por detrás de una manera más eficiente a la actual que puede ser un poco lenta.

En este mismo capítulo hemos podido comprobar que el comportamiento de CINDOOR es bastante bueno a pesar de haber sido creado en un principio para trabajar a bajas frecuencias.

Se ha confirmado que el grosor es relevante a la hora de calcular atenuaciones y hemos descubierto dos comportamientos diferentes al resto como han sido el ladrillo que no varía su atenuación con la frecuencia, al menos en la banda estudiada, y que el metal nos muestra una exponencial negativa debido a como trata CINDOOR los valores que están por encima de 100 dB.

En el cuarto capítulo hemos caracterizado el modelo geométrico de un laboratorio. Para llevar a cabo esta parte del trabajo se ha ido modelando el laboratorio de menos a más complejidad y se han ido analizando todos los resultados de las simulaciones.

Tras estudiar cuidadosamente todos los valores obtenidos hemos podido llegar a la conclusión de que no es necesario un modelo muy complejo, ya que al final con uno de 50 placas aproximadamente nos ha sido suficiente para llegar a los valores óptimos. También se ha observado que un modelo demasiado simple hace que los valores obtenidos no sean buenos.

Por otro lado, hemos visto que no hace falta añadir muchas reflexiones, ya que con incluir la tercera se han obtenido valores bastante próximos a los que se han obtenido cuando se han añadido dichas reflexiones.

Con este capítulo hemos demostrado que CINDOOR trabaja bien para frecuencias elevadas y que al no necesitar ni un modelo geométrico muy complejo, ni tener que incluir la cuarta y quinta reflexión, vamos a poder obtener los resultados de las simulaciones bastante rápido, además de ser resultados fiables.

Finalmente, para dar más peso a estas conclusiones se ha realizado un muestreo entorno al receptor. Haciendo la media de estos valores nuevos hemos obtenido que el comportamiento es muy similar al obtenido previamente. De esta forma queda demostrado que la posición del receptor o del transmisor puede variar algo con la posición real y aun así obtendríamos unas simulaciones buenas.

De esta forma se ha justificado el buen funcionamiento de CINDOOR para frecuencias altas que era el objetivo de este trabajo.

Para terminar este estudio se podría llevar a cabo una campaña de medidas reales del entorno simulado y contrastarlas con los valores obtenidos en las simulaciones para saber si realmente los cálculos que hace CINDOOR son correctos, pero esta parte no entra dentro de este trabajo, así que queda pendiente por hacer en algún momento.

Como se ha dicho antes se podría implementar en CINDOOR los valores de la atenuación para que para el usuario sea más cómodo de utilizar.

## 6. Bibliografía

- [1] <https://www.gemalto.com/latam/telecom/inspiracion/5g> (Comprobado por última vez el 04-07-2018)
- [2] <https://www.universidadviu.es/las-comunicaciones-moviles-sector-constante-innovacion/> (Comprobado por última vez el 04-07-2018)
- [3] <https://www.solvetic.com/page/recopilaciones/s/internet/que-es-tecnologia-5g-caracteristicas> (Comprobado por última vez el 04-07-2018)
- [4] CINDOOR: An Engineering Tool for Planning and Design of Wireless System in Enclosed Spaces.
- [5] R. P. Torres, S. Loredó, L. Valle and M. Domingo, "An accurate and efficient method based on ray-tracing for the prediction of local flat-fading statistics in picocell radio channels," in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 19, no. 2, pp. 170-178, Feb 2001. doi: 10.1109/49.914495
- [6] J.W. McKown and R. L. Hamilton, Jr., "Ray tracing as a design tool for radio networks," IEEE Network Mag., pp. 27–30, Nov. 1991.
- [7] A. G. Kanatas, I. D. Kountouris, G. B. Kostaras, and P. Constantinou, "A UTD propagation model in urban microcellular environments," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 46, pp. 185–193, Feb. 1997.
- [8] S. Loredó, L. Valle and R. P. Torres, "Accuracy analysis of GO/UTD radio-channel modeling in indoor scenarios at 1.8 and 2.5 GHz," in IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 43, no. 5, pp. 37-51, Oct 2001. doi: 10.1109/74.979366
- [9] UIT-R P.2040-1(07/2015) "Efectos de los materiales y estructuras de construcción en la propagación de las ondas radioeléctricas por encima de unos 100 MHz"
- [10] María del Carmen Díez González. "Modelos electromagnéticos para la simulación de la radiopropagación en entornos cerrados", Proyecto Fin de Carrera. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación. Universidad de Cantabria. 1997.