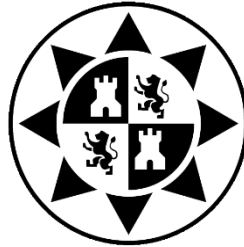


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA



Trabajo Fin de Máster

Caracterización del canal de radiocomunicaciones de banda ancha a frecuencias de milimétricas en entorno de plantación de cítricos



AUTOR: Luí́s Mart́nez Rubiola
DIRECTORES: Leandro Juan Lĺacer
Jośe Maŕa Molina Garća-Pardo

Octubre / 2020

Autor:	Luis Martinez Ruiloba
E-mail del Autor:	luigicrack@gmail.com
Directores:	Leandro Juan Llácer José María Molina García-Pardo
E-mail de los Directores:	leandro.juan@upct.es josemaria.molina@upct.es
Título del TFG:	Caracterización del canal de radiocomunicaciones de banda ancha a frecuencias de milimétricas en entorno de plantación de cítricos
Resumen:	<p>En la planificación de un sistema de radiocomunicaciones juega un papel fundamental el cálculo de cobertura radioeléctrica. Dicha estimación se realiza mediante herramientas de planificación que incorporan modelos de propagación electromagnéticos para estimar las pérdidas de señal, la dispersión temporal y espacial de la señal, etc. Estos modelos (experimentales y/o teóricos) están basados en teorías electromagnéticas y se diseñan para caracterizar el canal en una banda de frecuencias y en un entorno concreto (rural, suburbano, urbano, interiores). La mayoría de estos modelos se han venido utilizando para planificar sistemas de radiocomunicaciones (GSM, UMTS, LTE, ...) desplegados en entornos rurales o ciudades. En entornos rurales, las montañas se han modelado como aristas o como cuñas con ciertas propiedades dieléctricas y conductoras, utilizando teorías de óptica geométrica u óptica física para su caracterización. En entornos rurales, los edificios se han modelado también como aristas o cuñas.</p> <p>El desarrollo de la Agricultura 4.0 está llevando a la sensorización masiva de cultivos, la aparición de maquinaria y vehículos sin conductor, etc. y, por tanto, a la necesidad de desplegar sistemas de radiocomunicaciones que operan en diversas bandas de frecuencia en este tipo de entornos.</p> <p>El objetivo principal del proyecto es llevar a cabo una campaña de medidas en una plantación de cítricos para caracterizar el canal en este tipo de entornos.</p>
Titulación:	Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación
Departamento:	Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
Fecha de Presentación:	15/10/2020

AGRADECIMIENTOS

Llevar a cabo un trabajo Fin de Máster es algo complejo e interesante, que implica tiempo y dedicación. Aunque han surgido imprevistos, pese a ello, se ha conseguido el objetivo que se perseguía.

Quiero dar las gracias a todos los que han ayudado y apoyado a lo largo de la realización de este trabajo.

En primer lugar, me gustaría dar las gracias a mi tutor y director del TFM Don Leandro Juan Llácer por haberme dado la oportunidad de haber desarrollado este trabajo con él y por los consejos que me ha ido dando, además, de haberme enseñado a como desmenuzar bien los resultados para poder entender todo lo que se ha realizado, de la mejor manera posible.

En segundo lugar, quiero agradecer a Don José María Molina García Pardo, también director del TFM, por haber ayudado con sus rápidas y excelentes explicaciones sobre aquellas cosas que se escapaban. Y a Doña María Teresa Martínez Inglés (profesora del CUD – San Javier), por haber ayudado ambos en el trabajo de campo haciendo mediciones.

En tercer lugar, agradecer a mis directores del TFM, conjuntamente, por haberme acogido como un estudiante más de la UPCT sin apenas conocerme, ya que venía de otra Universidad, así como los valores que me han enseñado y que siempre me acompañarán.

Por último, aunque no menos importante, gracias a mis padres Pedro Martín Martínez y María Jesús Ruiloba, por su apoyo incondicional, y a mi hermano Jaime por ayudarme siempre.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	10
1.1. Introducción.....	10
1.2. Objetivos	10
1.3. Fases del Proyecto.....	10
1.4. Estructura	11
2. CARACTERIZACIÓN DEL CANAL RADIO	12
2.1. Estado del Arte	12
2.2. Estimación de las pérdidas de propagación y la dispersión temporal a partir de la respuesta en frecuencia.....	13
2.2.1. Espacio libre	13
2.2.2. Reflexión	13
2.2.3. Difracción	15
2.3. Perfil de retardo y respuesta en frecuencia	17
2.3.1. RMS Delay Spread	18
3. SISTEMAS DE MEDIDA.....	20
3.1. Equipamiento hardware.....	21
3.1.1. Analizador de redes vectorial	21
3.1.2. Antenas	22
3.1.3. Conversores Electrónicos.....	24
3.1.4. Cables y Conectores	25
4. METODOLOGÍA	27
4.1. Parámetros necesarios para realizar una medida	27
4.2. Procedimiento para realizar una medida	28

4.3. Ejemplo	29
5. MEDIDAS EN UNA PLANTACIÓN DE CÍTRICOS.....	39
5.1. Entorno de Medida	39
5.2. Bandas de Frecuencia y Parámetros	43
5.2.1. Pérdidas	44
5.2.1.1. Método CI	44
5.2.1.2. Método FI.....	45
5.2.2. Perfiles de Retardo (PDP)	52
5.2.3. RMS Delay Spread	56
6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS.....	67
6.1. Conclusiones	67
6.2. Futuras Líneas	69
BIBLIOGRAFÍA	70

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1 Campo Eléctrico Paralelo al Plano de Incidencia[9]</i>	14
<i>Figura 2 Campo Eléctrico Perpendicular al Plano de Incidencia[9]</i>	14
<i>Figura 3 Límites Zonas de Fresnel</i>	16
<i>Figura 4 Zonas de Fresnel</i>	16
<i>Figura 5 Ancho de Banda</i>	17
<i>Figura 6 Measurements System</i>	20
<i>Figura 7 Analizador Parte Frontal y Parte Trasera (Conexiones)</i>	21
<i>Figura 8 Keyboard and Mouse (VNA)</i>	21
<i>Figura 9 Antenas Bicónicas, modelo SCHWARZBECK SBA 9113. [SCHW9113]</i>	22
<i>Figura 10 Especificaciones antena SCHWARZBECK SBA 9113</i>	22
<i>Figura 11 Antenas Omnidireccionales modelo QOM-SL-0.8-40-K-SG-L[12]</i>	23
<i>Figura 12 Especificaciones antena SCHWARZBECK SBA 9113[12]</i>	23
<i>Figura 13 Antena Bocina QSH-SL-26-40-K-20[11]</i>	24
<i>Figura 14 Especificaciones antena QSH-SL-26-40-K-20[11]</i>	24
<i>Figura 15 Conversores Electrónicos</i>	24
<i>Figura 16 Conversor Electrónico TX y RX</i>	25
<i>Figura 17 Cables 3M longitud</i>	25
<i>Figura 18 Transiciones hembra y macho</i>	26
<i>Figura 19 Fibra Óptica 100 M longitud</i>	26
<i>Figura 20 Login VNA</i>	29
<i>Figura 21 S21</i>	30
<i>Figura 22 Format Magnitude</i>	30
<i>Figura 23 Frecuencia Central y Span</i>	31
<i>Figura 24 AVG SWEEP</i>	31
<i>Figura 25 IF Bandwidth</i>	32

<i>Figura 26 SOURCE Power Tx</i>	32
<i>Figura 27 SWEEP</i>	33
<i>Figura 28 Number of Points</i>	33
<i>Figura 29 Start New Cal</i>	34
<i>Figura 30 CAL Both Directions</i>	34
<i>Figura 31 Trans Norm</i>	35
<i>Figura 32 Through</i>	35
<i>Figura 33 Apply Cal</i>	36
<i>Figura 34 Save File</i>	36
<i>Figura 35 Select Items to Save</i>	37
<i>Figura 36 Select ASCII File</i>	37
<i>Figura 37 Open Saved Route</i>	38
<i>Figura 38 Imagen Vista Satélite del Entorno de Medidas</i>	39
<i>Figura 39 Imagen de las Características del Entorno</i>	40
<i>Figura 40 Imagen Medición en Entorno Real</i>	40
<i>Figura 41 Imagen Distancia y Colocación de las Antenas en Entorno Real</i>	41
<i>Figura 42 Imagen de las Antenas Conectadas en Entorno Real 1</i>	41
<i>Figura 43 Imagen de las Antenas Conectadas en Entorno Real 2</i>	42
<i>Figura 44 Pérdidas Bicónica Polariz V 800 MHz</i>	45
<i>Figura 45 Pérdidas Bicónica Polariz V 1800 MHz</i>	46
<i>Figura 46 Pérdidas Bicónica Polariz V 2100 MHz</i>	47
<i>Figura 47 Pérdidas Bicónica Polariz H 800 MHz</i>	47
<i>Figura 48 Pérdidas Bicónica Polariz H 1800 MHz</i>	48
<i>Figura 49 Pérdidas Bicónica Polariz H 2100 MHz</i>	48
<i>Figura 50 Pérdidas Omni 3.5 GHz</i>	49
<i>Figura 51 Pérdidas Omni 28 GHz</i>	50
<i>Figura 52 Pérdidas Bocina 28 GHz</i>	50

<i>Figura 53 Comparación Pérdidas Bocina y Omni 28 GHz</i>	<i>51</i>
<i>Figura 54 Power Delay Profile Bicónica Polariz V</i>	<i>52</i>
<i>Figura 55 Power Delay Profile Bicónica Polariz H.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 56 Power Delay Profile Omni 3.5 GHz.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 57 Power Delay Profile Omni 28 GHz.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 58 Power Delay Profile Bocina 28 GHz.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 59 RMS Delay Spread Bicónica Polariz V 800 MHz</i>	<i>57</i>
<i>Figura 60 RMS Delay Spread Bicónica Polariz V 1800 MHz</i>	<i>58</i>
<i>Figura 61 RMS Delay Spread Bicónica Polariz V 2100 MHz</i>	<i>59</i>
<i>Figura 62 RMS Delay Spread Biconica Polariz H 800 MHz.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 63 RMS Delay Spread Bicónica Polariz H 1800 MHz.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 64 RMS Delay Spread Bicónica Polariz H 2100 MHz.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 65 RMS Delay Spread Omni 3.5 GHz</i>	<i>63</i>
<i>Figura 66 RMS Delay Spread Omni 28 GHz</i>	<i>64</i>
<i>Figura 67 RMS Delay Spread Bocina 28 GHz.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 68 RMS Delay Spread Comparación Bocina y Omni 28 GHz.....</i>	<i>66</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 Parámetros Resolución Temporal.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 2 Tabla con los Parámetros de las Antenas</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 3 Configuración de los Parámetros</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 4 Resultados Obtenidos para cada Antena y Frecuencia de Trabajo.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 5 Comparación de Resultados Bocina VS Omni.....</i>	<i>51</i>



1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Introducción

En la planificación de un sistema de radiocomunicaciones juega un papel fundamental el cálculo de cobertura radioeléctrica. Dicha estimación se realiza mediante herramientas de planificación que incorporan modelos de propagación electromagnéticos para estimar las pérdidas de señal, la dispersión temporal y espacial de la señal, etc. Estos modelos (experimentales y/o teóricos) están basados en teorías electromagnéticas y se diseñan para caracterizar el canal en una banda de frecuencias y en un entorno concreto (rural, suburbano, urbano, interiores). La mayoría de estos modelos se han venido utilizando para planificar sistemas de radiocomunicaciones (GSM, UMTS, LTE, ...) desplegados en entornos rurales o ciudades. En entornos rurales, las montañas se han modelado como aristas o como cuñas con ciertas propiedades dieléctricas y conductoras, utilizando teorías de óptica geométrica u óptica física para su caracterización. En entornos urbanos, los edificios se han modelado también como aristas o cuñas.

El desarrollo de la Agricultura 4.0 está llevando a la sensorización masiva de cultivos, la aparición de maquinaria y vehículos sin conductor, etc. y, por tanto, a la necesidad de desplegar sistemas de radiocomunicaciones que operan en diversas bandas de frecuencia en este tipo de entornos.

1.2. Objetivos

El objetivo principal del proyecto es conocer el canal radio en banda ancha en entornos cítricos, para lo cual se realiza una campaña de medidas.

1.3. Fases del Proyecto

Las fases a seguidas en este trabajo han sido:

1. Estado del arte de sistemas de medidas utilizados en entornos agrícolas.
2. Desarrollo e implementación de un sistema de medidas para las bandas por debajo de 6GHz y milimétricas (concretamente 26GHz y 28GHz)
3. Llevar a cabo una campaña de medidas en una plantación de cítricos.



4. Analizar las medidas y caracterizar el canal de radiocomunicaciones en diversas bandas de frecuencias desde el punto de vista de pérdidas de propagación y dispersión temporal
5. Redacción de la memoria.

1.4. Estructura

En el capítulo 2, se describen los mecanismos de propagación y las expresiones utilizadas para estimar de las pérdidas de propagación. Además, se explica qué es la respuesta en frecuencia y a su vez, se describe la dispersión temporal y su relación con la respuesta en frecuencia.

En el capítulo 3, se lleva a cabo una explicación general de los componentes que forman nuestro sistema de medidas, cuyo equipamiento hardware incluye: un analizador de redes, cables y conectores, antenas que trabajan a diferentes rangos de frecuencias y conversores electroópticos. A continuación, se describen los parámetros más importantes y se redacta paso a paso cómo se tiene que configurar los diversos equipos para llevar a cabo una medición y se incluye un ejemplo de ello.

En el capítulo 4, se lleva a cabo un estudio de las mediciones realizadas, en el que se incluye la ubicación geográfica mostrando las características del entorno. Empleando el software MATLAB, se relacionan diferentes parámetros del canal de propagación y mediante diversos códigos, se podrá comprobar la influencia de las distintas condiciones impuestas.

En el último capítulo, se exponen las principales conclusiones que se han extraído a partir del estudio realizado para el canal de propagación en una plantación de cítricos en un entorno microcelular.



2. CARACTERIZACIÓN DEL CANAL RADIO

En este capítulo se presenta una introducción a la caracterización del canal radio, con el fin de establecer un marco de referencia para el resto de capítulos del presente trabajo. Para ello, en primer lugar, se expone como se encuentra el estudio del canal radio.

A continuación, se presentan los principales mecanismos de propagación que influyen en la transmisión de la señal. En concreto, se hablará de la propagación en espacio libre, la reflexión y la difracción.

Por último, se exponen los cálculos para realizar una estimación de las pérdidas de propagación y de la dispersión temporal. Los parámetros que permiten realizar estas estimaciones son el perfil de retardo y el RMS delay spread.

2.1. Estado del Arte

La caracterización del canal de propagación entre dos antenas o dos dispositivos colocados a una cierta distancia en diferentes entornos ambientales, es un campo muy bien tratado en la literatura, ya que es la base para poder llevar a cabo cualquier experimento que se trate sobre la transmisión de señales.

El estudio de la propagación en el canal radio se realiza mayoritariamente desde la perspectiva del modelado de las pérdidas de propagación y el comportamiento dispersivo temporal del canal. Otros modelos pueden ser la respuesta al impulso del canal. Se pueden encontrar detallados diferentes modelos como un modelo de PDP a diferentes bandas de frecuencia, modelos autoregresivos, etc.

Por otro lado, estos parámetros están condicionados por factores externos, como por ejemplo, el número de antenas empleadas tanto para el transmisor como para el receptor, la distancia de separación entre todas ellas, el entorno en el que se vaya a realizar las mediciones, etc.

Habitualmente, el modelado de propagación se lleva a cabo desde una perspectiva estadística a partir de la información acerca del canal radio obtenida ya sea mediante la medida de la respuesta en frecuencia del canal por medio de un analizador de redes vectorial o VNA (medida del canal radio en frecuencia), o la respuesta al impulso por medio de un osciloscopio digital (medida del canal radio en el tiempo).



Sin embargo, si se quiere centrar el estudio del canal de propagación a un entorno específico, como es en el caso de este trabajo, en particular a un entorno de plantaciones de cítricos, existen serias dificultades para encontrar información, análisis o estudios realizados en dicho entorno, ya que como se ha mencionado anteriormente, sí que existen una gran cantidad de estudios que sirven como base para realizar otras estimaciones, pero en algunos casos hay entornos que no se han estudiado, y aunque los parámetros o los mecanismos a seguir sean los mismos, no hay datos con los que se puedan comparar los resultados entre diferentes proyectos para poder comparar si estos datos obtenidos de las mediciones son coherentes o no, simplemente puedes hacerte una idea aproximada pero no a ciencia cierta.

2.2. Estimación de las pérdidas de propagación y la dispersión temporal a partir de la respuesta en frecuencia

Los principales fenómenos que influyen en la propagación son la reflexión de la señal transmitida en elementos del entorno, la difracción, la dispersión y el bloqueo de la señal por diferentes obstáculos. Éstos provocan que al receptor llegue una composición de réplicas de la señal original, retardadas, atenuadas y posiblemente, distorsionadas.

2.2.1. Espacio libre

Se considera espacio libre cuando entre el transmisor y el receptor no hay obstáculos. Las pérdidas por propagación en espacio libre se estiman mediante la expresión [9] (2.1):

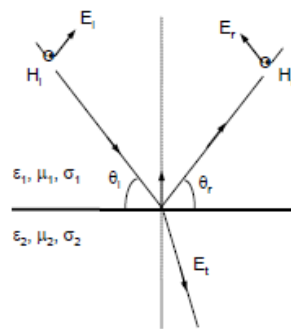
$$L_0 = -20 \log_{10} \left(\frac{3 \times 10^8}{4\pi r f} \right) \quad (2.1)$$

2.2.2. Reflexión

La reflexión es el cambio de dirección de una onda al incidir sobre otro medio sabiendo que el rayo incidente, el rayo reflejado y la normal se encuentran en un mismo plano denominado plano de incidencia, y que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.



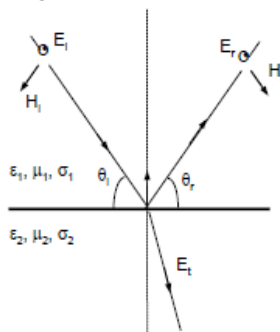
Campo eléctrico paralelo al plano de incidencia



$$R_{||}(\psi) = \frac{\epsilon_r \text{sen } \psi - \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \psi}}{\epsilon_r \text{sen } \psi + \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \psi}}$$

Figura 1 Campo Eléctrico Paralelo al Plano de Incidencia[9]

Campo eléctrico perpendicular al plano de incidencia



$$R_{\perp}(\psi) = \frac{\text{sen } \psi - \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \psi}}{\text{sen } \psi + \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \psi}}$$

Figura 2 Campo Eléctrico Perpendicular al Plano de Incidencia[9]

Hay dos tipos de polarización:

- Vertical: cuando el campo eléctrico este contenido en el plano vertical, dicho plano será perpendicular al suelo y contendrá al transmisor y receptor.
- Horizontal: cuando el campo eléctrico esté contenido en el plano horizontal, es decir, perpendicular al plano vertical.



2.2.3. Difracción

La difracción es producida cuando en la trayectoria del transmisor y el receptor se encuentra un obstáculo. Esto provoca, que se pueda recibir señal ~~no~~ en la zona de sombra (difracción), también es cierto, que la atenuación de la señal en esta zona es superior a la que se

produce en espacio libre. Así mismo, no es necesario que esta obstrucción se encuentre directamente en la trayectoria visual entre las antenas, es decir, cuando uno de sus límites se encuentre a una determinada distancia de la trayectoria visual, a la cual, adquiera la suficiente importancia como para considerar el fenómeno de difracción.

Para cuantificar el efecto de la difracción, se asume que el campo incidente sobre el receptor es la contribución de los campos contenidos en elipsoides que envuelven el enlace directo. A dichas zonas (elipsoides) se las conoce como Zonas de Fresnel.

Las superficies que delimitan las Zonas de Fresnel se definen como el lugar geométrico de los puntos en los que la señal reflejada en los mismos difiere de la señal directa en un punto múltiplo de $\frac{\lambda}{2}$.

Si se piensa en planos perpendiculares al trayecto transmisor-receptor, tendríamos unas circunferencias, correspondientes al corte de las distintas elipsoides, cuyos radios se conocen como Radios de las distintas zonas de Fresnel, y los podemos hallar mediante [8] (2.2).

RADIOS ZONAS DE FRESNEL

$$R_n = \left[\frac{n \cdot \lambda \cdot d_1 \cdot d_2}{d_1 + d_2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

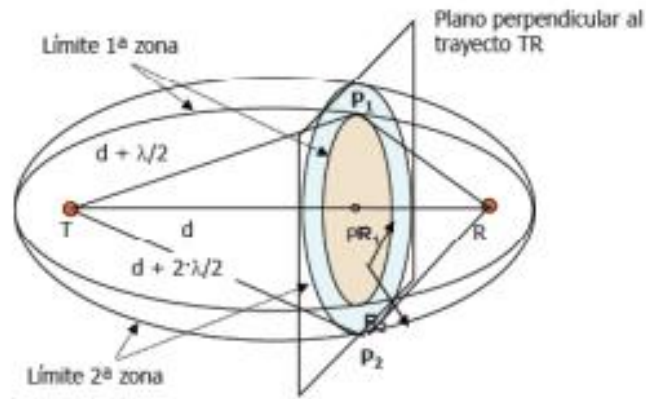


Figura 3 Límites Zonas de Fresnel

Una vez definidas las zonas de Fresnel, sus radios y el despeje, las pérdidas por difracción (objetivo) se obtendrán a partir de la siguiente gráfica:

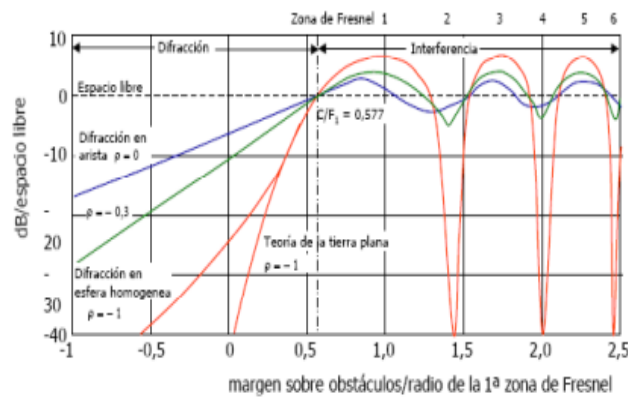


Figura 4 Zonas de Fresnel

Siendo el eje de ordenadas : $20 \log \left(\frac{E}{E_0} \right) (dB)$



2.3. Perfil de retardo y respuesta en frecuencia

En las comunicaciones inalámbricas, las pérdidas de propagación se producen por presencia de obstrucciones en la ruta de la señal, posteriormente degradando la transmisión entre la estación base y un dispositivo receptor. La pérdida de señal es atribuible a una serie de factores, incluida la distancia entre el transmisor y el receptor, la altura de la antena del transmisor y del receptor, rango de frecuencia, vegetación y estructuras artificiales. La investigación actual utiliza una amalgama de modelos de predicción de pérdida de trayectoria para minimizar el error de predicción.

Las pérdidas de propagación son la cantidad de pérdidas introducidas por la propagación medio ambiente entre un transmisor y un receptor. Pérdida de potencia que ocurre cuando las ondas de reflexión se transmiten a través del aire. Esta pérdida se produce porque la atmósfera proporciona un efecto de filtrado a la señal. Ciertas frecuencias electromagnéticas (muy altas y no comerciales) están completamente bloqueadas o filtradas por el ambiente.

La medida de la respuesta en frecuencia del canal nos permite, por tanto, analizar tanto las pérdidas por propagación como la dispersión temporal. Para cada medida debemos plantearnos la resolución temporal (distancia entre dos contribuciones diferentes que vamos a poder resolver) y el tiempo máximo (ventana temporal) de las contribuciones del campo total.

La resolución temporal τ viene fijada por el ancho de banda BWR (ver figura 8) como $1/BWR$, el tiempo máximo es $1/BW=(N-1)/BWR$, si empezamos en 0, siendo N el número de muestras de la respuesta en frecuencia.

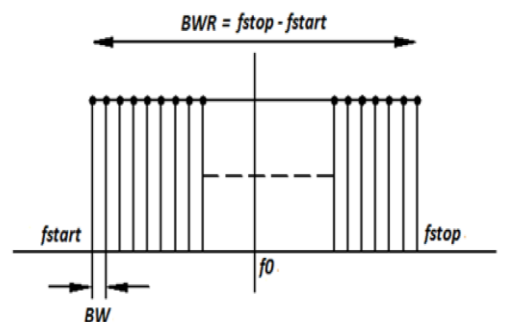


Figura 5 Ancho de Banda



A partir de la respuesta en frecuencia, podemos calcular el perfil de retardo (Power Delay Profile, PDP, en inglés) [9] con la siguiente expresión (2.3):

$$PDP(\tau) = |h(\tau)|^2 \quad (2.3)$$

Siendo $h(\tau)$ la respuesta al impulso calculada como [9] (2.4):

$$h(\tau) = \text{ifft}(H(f)) \quad (2.4)$$

Las pérdidas de propagación pueden calcularse entonces como [9] (2.5):

$$PL(d) = -10 \log_{10}(\sum_{\tau} PDP(\tau)) \quad (2.5)$$

El valor máximo del perfil de retardo se calculará de la siguiente manera [9] (2.6):

$$MAX_{PDP} = \max(10 \log_{10}(PDP(\tau))) \quad (2.6)$$

2.3.1. RMS Delay Spread

La dispersión de retardo (τ_{rms}) se usa a menudo para cuantificar la probabilidad de inter-símbolo interferencia en un canal de propagación.

Se espera que los sistemas de comunicación de *Ultra Wideband* se apliquen principalmente en redes de corto rango. Como los niveles de potencia permitidos son significativamente más bajos en comparación con otras tecnologías inalámbricas, la mayoría de las aplicaciones se limitarán al escenario de habitación individual. En estos entornos, la pérdida de ruta debería presentar un problema menor en comparación con la inevitable propagación de retraso causada por múltiples reflexiones. Ya se sabe que la dispersión de retardo puede correlacionarse directamente con la interferencia entre símbolos.

El tiempo de dispersión debido a múltiples componentes puede limitar tanto la velocidad de transmisión de datos como la capacidad en sistemas de comunicación UWB multiusuario, y tiene un gran impacto en la complejidad del transceptor UWB. El parámetro más importante para caracterizar el comportamiento de tiempo de dispersión de cualquier canal de propagación inalámbrico es la extensión de retardo de la media cuadrática (τ_{rms}), que corresponde al segundo momento central del perfil de potencia-retardo o PDP.



En el canal de propagación el efecto multicamino provoca, que la señal recibida, esté formada por réplicas atenuadas y retardadas de la señal transmitida, lo cual aumenta el ensanchamiento efectivo de la señal recibida en el tiempo y desvanecimientos en la frecuencia.

Se puede cuantificar el efecto de dispersión de retardo, según el perfil de potencia-retardo del canal en base a dos parámetros: retardo medio o τ_m (mean excess delay) [10] (2.7) y valor cuadrático medio (rms) del ensanchamiento o τ_{rms} [10] (2.8). Estos parámetros se pueden calcular de la siguiente forma:

$$\tau_m = \frac{\sum_{k=1}^L P_h(\tau_k) \cdot \tau_k}{\sum_{k=1}^L P_h(\tau_k)} \quad (2.7)$$

$$\tau_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^L P_h(\tau_k) \cdot \tau_k^2}{\sum_{k=1}^L P_h(\tau_k)} - \left(\frac{\sum_{k=1}^L P_h(\tau_k) \cdot \tau_k}{\sum_{k=1}^L P_h(\tau_k)} \right)^2} \quad (2.8)$$

En general, se emplea el parámetro τ_{rms} [10] (2.8) para cuantificar el efecto de la dispersión de retardo en el canal, ya que diferentes canales con sus respectivos perfiles de potencia-retardo pueden dar lugar al mismo retardo medio τ_m [10] (2.7).



3. SISTEMAS DE MEDIDA

En nuestro sistema de medidas participan diferentes elementos, cada cual con su implicación directa a la hora de realizar una medición.

Se dispone de un par de antenas de diferentes tipos que abarcan diversos rangos de frecuencias, (bocina, omnidireccional y cónica). A su vez, éstas se colocan en trípodes de plástico, para introducir el menor número de pérdidas posibles, a una altura de 1.50 metros.

Para generar señales, se utiliza un VNA (analizador de redes vectorial) al que se conectan a los puertos las antenas, el puerto 1 será el Tx y el puerto 2 el Rx.

Por otro lado, se han utilizado conversores electroópticos y cable de fibra óptica cuya longitud es de 100 metros. Además, se ha trabajado en un rango de frecuencias que abarca desde 800 MHz hasta 29 GHz, utilizando las diversas antenas mencionadas anteriormente en función de la frecuencia.

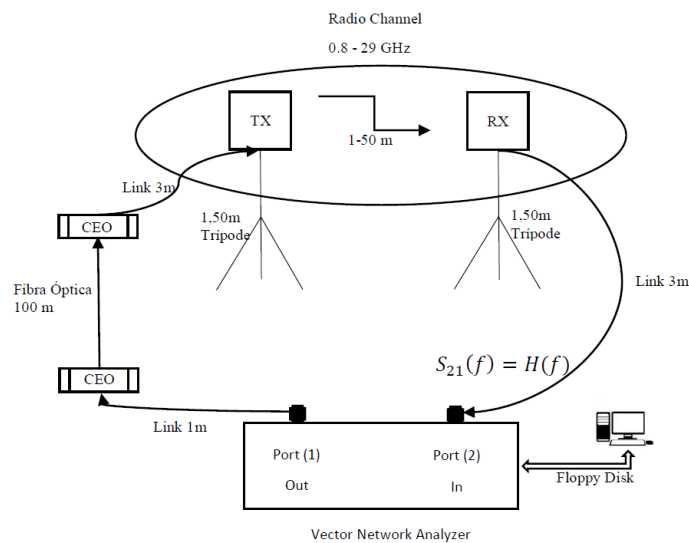


Figura 6 Measurements System



3.1. Equipamiento hardware

Este apartado incluye imágenes de todos los elementos que se han empleado en la realización de las medidas, así como explicaciones sobre los tipos de antena, analizador de redes utilizado, conversores electroópticos, cables, etc.

3.1.1. Analizador de redes vectorial

En primer lugar, se ha empleado un analizador de redes vectorial o VNA, que servirá para crear la señal, y cuya frecuencia de trabajo va desde 0-40 GHz. Además, en la Figura 7, se muestra tanto la parte frontal como la parte trasera de los diferentes botones y conexiones que nos permite emplear este analizador de redes vectorial.



Figura 7 Analizador Parte Frontal y Parte Trasera (Conexiones)

Además, para poder utilizar el VNA de una manera más cómoda y rápida, se ha empleado un ratón y teclado mediante conexión USB, como se puede apreciar en la Figura 8.

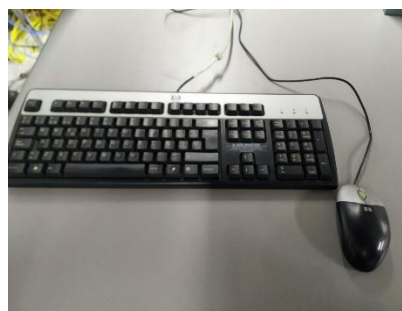


Figura 8 Keyboard and Mouse (VNA)



3.1.2. Antenas

En este apartado, se detallan todas las antenas que se han empleado en las diferentes mediciones que se han llevado a cabo. En primer lugar, en la Figura 9, se muestra el tipo de antena bicónica, la cual se ha empleado para frecuencias bajas y que alcanza los 3 GHz. Y a continuación, en la Figura 10 se muestra su ficha técnica, en la cual se puede observar datos muy interesantes y que nos han permitido usarla a frecuencia de 800 MHz y 1.5 GHz.



Figura 9 Antenas Bicónicas, modelo SCHWARZBECK SBA 9113. [SCHW9113]

Technische Daten:		Specifications:	
Linear polarisierte Mikrowellen-Bikonus-Breitbandantenne		Linear polarised microwave biconical broadband antenna	
Frequenzbereich:	500 MHz - 3 GHz	Frequency range:	
Anschluß: Buchse	50 W/N	Connector: female	
Befestigungsrohr:	$L_M=560\text{mm}$, $d=22\text{mm}$	Mounting tube:	
Rastring	$L_R=190\text{mm}$	Index Ring:	
Elementlänge gesamt:	$L_E=140\text{mm}$	Element length total:	
Elementdurchmesser:	$D=49\text{mm}$	Element diameter:	
Elementaufnahme:	M 4	Element fixture:	
Isotropiegewinn:	typ. -1.5...+1.5 dBi (600 MHz - 3 GHz)	isotropic gain:	
Antennenwandlungsmaß:	25 ... 41 dB/m	Antenna Factor:	
SWR typ.:	1.4	SWR typ.:	
Balun (verlustarm):	1:1	Balun (low loss):	
Inversionssymmetrie:	typ. < 0.2 dB (600 MHz - 3 GHz)	Inversion Symmetry:	
Max. Eingangsleistung:	20 W	Max. Input Power:	
Halbwertsbreite E-Ebene:	80° - 50°	Half-Power Beamwidth (E-plane):	
Gewicht:	750 g	Weight:	

Figura 10 Especificaciones antena SCHWARZBECK SBA 9113

En segundo lugar, en la Figura 11 se muestran en las antenas omnidireccionales, las cuales se han empleado a frecuencias de 3.5 GHz y 28 GHz. Ya que, según sus especificaciones abarcan un gran rango de frecuencias hasta alcanzar incluso los 40 GHz. Y del mismo modo que en el caso anterior, también se muestra ficha técnica en la Figura 12.



Figura 11 Antenas Omnidireccionales modelo QOM-SL-0.8-40-K-SG-L[12]

Typical Specification	
Frequency	0.8 to 40 GHz
Connector type	K type (2.9 mm) jack
Power Handling	40 Watt c.w.
VSWR	< 3.2:1 maximum, typically < 2.5:1
Gain	-2.2 to 5.9 dBi for 1 to 40 GHz
Antenna Factor	30 to 58.3 dB/m
3dB Beamwidth	18 to 160 degrees
10dB Beamwidth	44 to 172 degrees
Weight	860 g (with bracket)
Maximum size	100 mm diameter x 108 mm long, excluding bracket.
Mounting	Pole mounting bracket. To suit pole up to 28 mm diameter.
Construction	Composite aluminium / plastic, painted. PTFE radome

Figura 12 Especificaciones antena SCHWARZBECK SBA 9113[12]

Por último, el tercer tipo de antena que se ha utilizado ha sido de tipo bocina, o también llamadas directivas, mostradas en la Figura 13. Las cuales se han empleado solo a la frecuencia de 28 GHz, ya que no son adecuadas emplearlas a frecuencias bajas. Una vez más se adjunta sus especificaciones mediante la Figura 14.

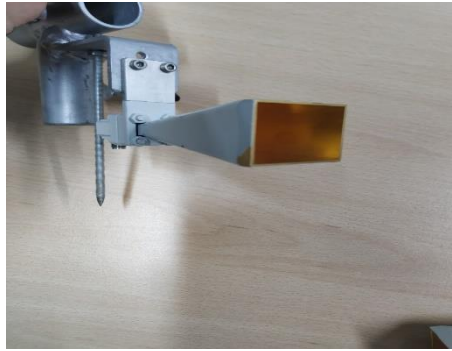


Figura 13 Antena Bocina QSH-SL-26-40-K-20[11]

Frequency	26.5 to 40 GHz
Connector type	K type jack
Power Handling	20 Watt c.w.
VSWR	Typically < 1.3:1
Gain	17.7 to 20.9 dBi
Antenna Factor	41 to 41.4 dB/m
3dB Beamwidth	14.5 to 22.5 degrees
10dB Beamwidth	26.3 to 41.7 degrees
Weight	146 g nominal
Size- max.	36 mm x 28 mm external aperture x 100 mm long
Mounting	Mounting bracket with 2 holes, diameter 3.1 mm, on 12 mm centres.
Construction	Electroformed copper with anodised aluminium mounting bracket.

Figura 14 Especificaciones antena QSH-SL-26-40-K-20[11]

3.1.3. Conversores Electrónicos

En esta subsección, se muestran los conversores electrónicos, mediante la Figura 15 y Figura 16. Ambos, una conectado al transmisor y otro al receptor, permiten la conversión de la señal para poder ser transmitida por fibra óptica, ya que, para realizar las mediciones a largas distancias de separación se ha requerido el uso de 100 metros de fibra óptica.



Figura 15 Conversores Electrónicos

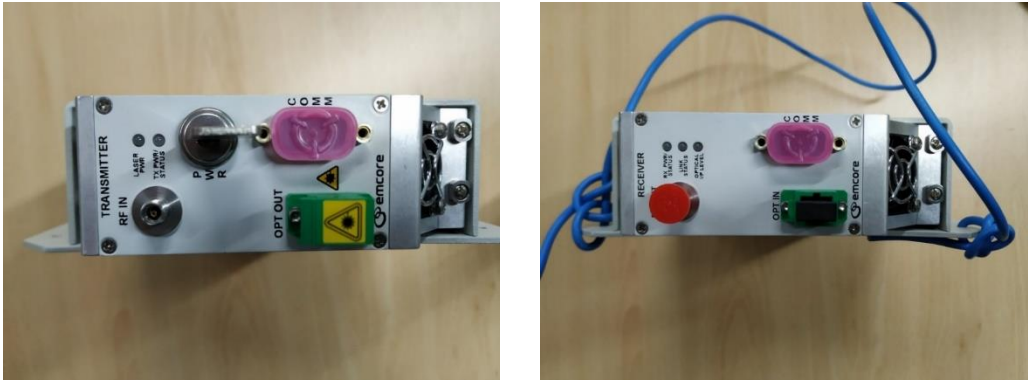


Figura 16 Conversor Electrónico TX y RX

3.1.4. Cables y Conectores

En este subapartado se muestran los cables y conectores que se han empleado en la realización de las medidas.

En primer lugar, según se muestra en la Figura 17, se ha precisado emplear cables de 3 metros de longitud para conectar los equipos entre sí.



Figura 17 Cables 3M longitud



En segundo lugar, se muestran las transiciones que se han requerido para poder conectar los dispositivos entre sí, como se muestra en la Figura 18.



Figura 18 Transiciones hembra y macho

Por último, se muestra la fibra óptica empleada, en este caso se corresponde con la Figura 21, cuya longitud es de 100 metros, Además, en la Figura 22, se muestran el tipo de conector que emplean, cuya delicadeza es extrema.

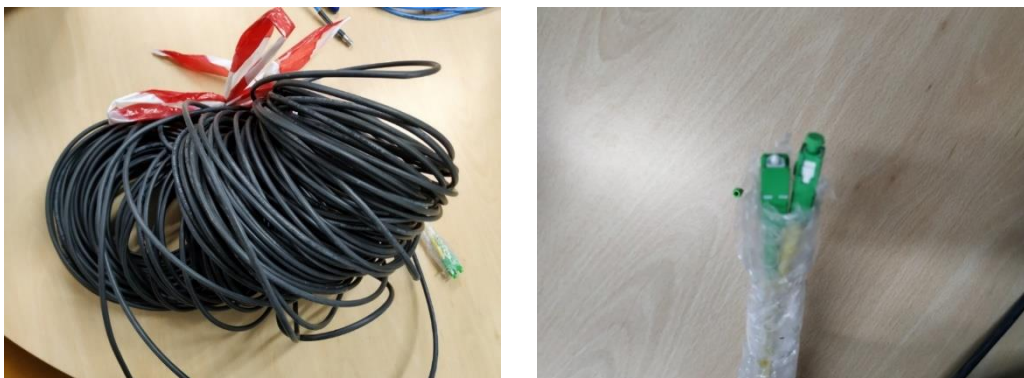


Figura 19 Fibra Óptica 100 M longitud



4. METODOLOGÍA

En este apartado, se explica con detalle los parámetros que se han necesitado conocer para realizar las mediciones, así como el procedimiento de la realización de cualquier medida aquí presente y por último un ejemplo detallado, para que además sirva de ayuda para futuros proyectos y ahorren trabajo a la hora de intentar conocer cómo funcionan los diferentes equipos.

4.1. Parámetros necesarios para realizar una medida

En este apartado se enumerarán los parámetros principales que se deben configurar en nuestro VNA para realizar cualquier medición.

- Frecuencia Central (CF): es la frecuencia en donde se lleva a cabo el efecto total de la ganancia o la atenuación.
- Span: rango de frecuencias que aparece en pantalla.
- Ancho de Banda (BW): es la longitud, cuya unidad es Hz, de la extensión de frecuencias en las que se concentra la mayor potencia del canal.
- Potencia Tx (Power): medida en dB.
- Ancho de Banda de Integración (IF): diferencia entre la frecuencia máxima y mínima que se puede transportar sin atenuación.
- S21: parámetro de transmisión entre transmisor y receptor.
- Formato (Magnitude)
- Número de Puntos (N): número de puntos en los que se divide el ancho de banda.



4.2. Procedimiento para realizar una medida

A continuación, se enumeran los pasos a seguir para llevar a cabo una medición:

1. Encender el Analizador de Redes Vectorial y comprobar que todos los componentes, tanto ratón como teclado funcionan correctamente.
2. Introducir Usuario “administrator” y pass “894129” y esperar que el software se inicie solo.
3. Una vez abierto el software, seleccionar “MEAS” y el parámetro de transmisión “S21”.
4. El siguiente paso será introducir la frecuencia central y el Span deseado.
5. Seleccionamos el formato “Magnitude”.
6. A continuación, se configura el ancho de banda de integración “IF Bandwidth”.
7. Lo siguiente será introducir la potencia de transmisión, presionando “SOURCE” y acto seguido “POWER”.
8. Otro paso importante, será definir el número de puntos, mediante el botón “SWEEP” y seleccionando “Number of Points”.
9. En este punto, ya tendremos todos los parámetros necesarios configurados, por tanto, es el momento de llevar a cabo la calibración, este paso es muy importante y cada vez que se modifique cualquier parámetro o disposición de los diferentes elementos que componen el sistema, se tendrá que llevar a cabo de nuevo la calibración. Presionaremos el botón “CAL” y seleccionaremos “START NEW CAL”. Posteriormente, seleccionaremos “BOTH DIRECT’NS”. El paso siguiente será marcar “TRANS NORM”. Posteriormente, presionamos “THROUGH”, y seguidamente, seleccionamos “APPLY CAL” y pasados unos segundos, se calibrará situándose en 0 dB.
10. A continuación, se procederá a guardar la medición realizada en un archivo de texto. Para ello presionamos el botón “SAVE” en la parte izquierda del VNA.
11. De tal modo, debemos seleccionar “SEL ITEMS TO SAVE” y deseleccionar todos y marcar “ASCII FILE”, este archivo contendrá todos los parámetros necesarios para poder utilizarlo posteriormente en MATLAB.
12. Por último, para salir del software del VNA presionamos simultáneamente las teclas ALT + YSREQ/IMPPANT del teclado, y nos situaremos en el escritorio.
13. A continuación, abriremos la carpeta donde se encuentran los archivos guardados de las mediciones: Computer->Rohde(C:)->User->Config



4.3. Ejemplo

En este apartado se llevará a cabo un ejemplo para que en tiempos posteriores a su utilización sirva de ayuda para la realización de medidas.

En primer lugar, al encender el VNA nos pedirá el nombre de usuario y la contraseña:

User: administrator; pass: 894129

Esperaremos a que se abra automáticamente el software del VNA.



Figura 20 Login VNA

Una vez se abra el software, lo primero de todo será seleccionar el parámetro S21:

Presionamos “MEAS” y seleccionamos “S21 TRANS FWD”.

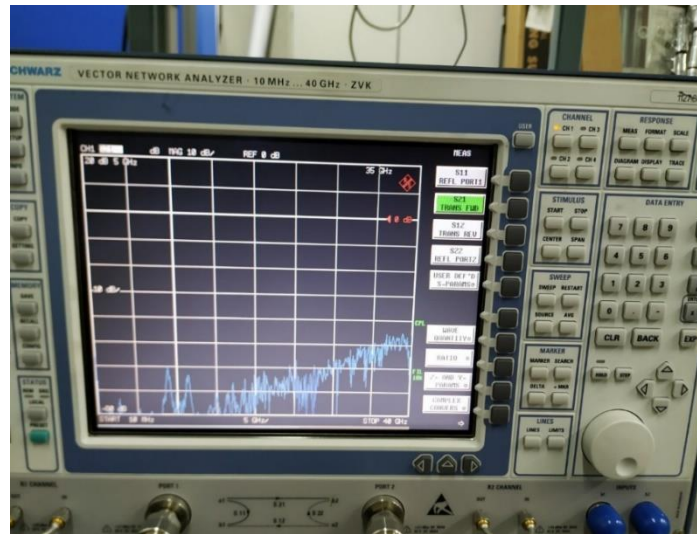


Figura 21 S21

A continuación, tendremos que seleccionar el formato de visualización de los datos mostrados por pantalla. De tal modo, en la parte superior derecha, presionaremos el botón “FORMAT”, y seguidamente nos aparecerá en pantalla.

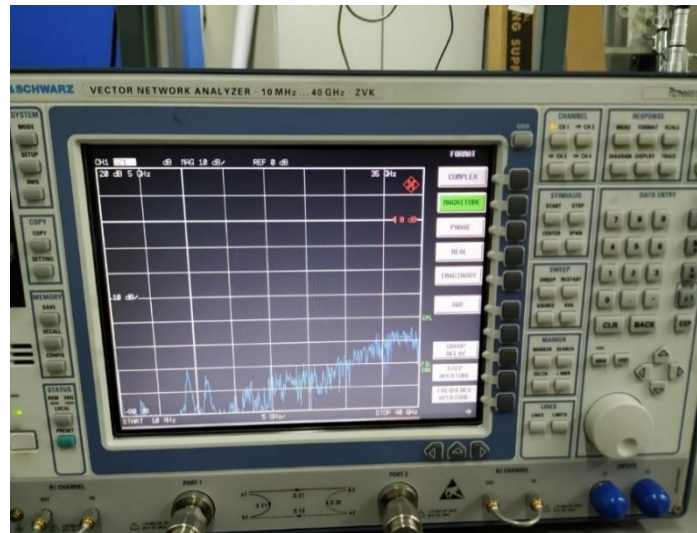


Figura 22 Format Magnitude



A continuación, para introducir la frecuencia central, el ancho de banda, así como el span y las frecuencias iniciales y final, tenemos varias opciones, todas ellas situadas en el margen derecho del analizador.

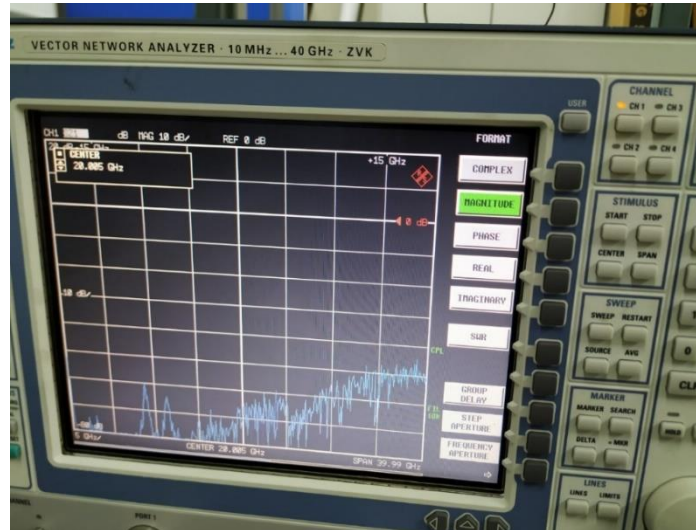


Figura 23 Frecuencia Central y Span

Otro de los parámetros que se pueden configurar, en el ancho de banda de integración, “IF BANDWIDTH”, cuyo margen es 1 Hz – 10kHz. Para nuestro caso, seleccionaremos 10kHz.

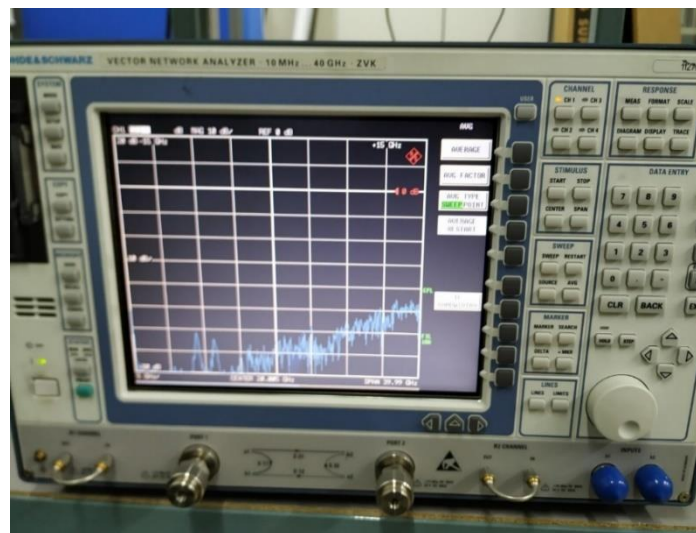


Figura 24 AVG SWEEP

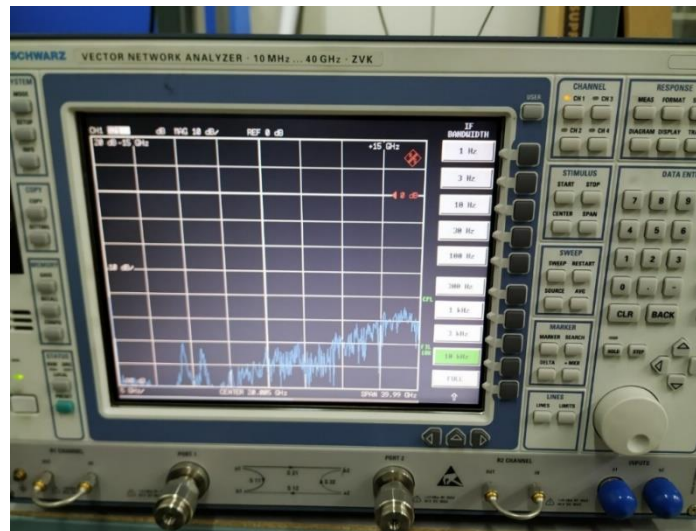


Figura 25 IF Bandwidth

Del mismo modo, también se puede configurar la potencia de transmisión, presionando el botón “SOURCE” situado a la derecha del VNA, y a continuación mediante “POWER”, se podrá introducir la potencia deseada.

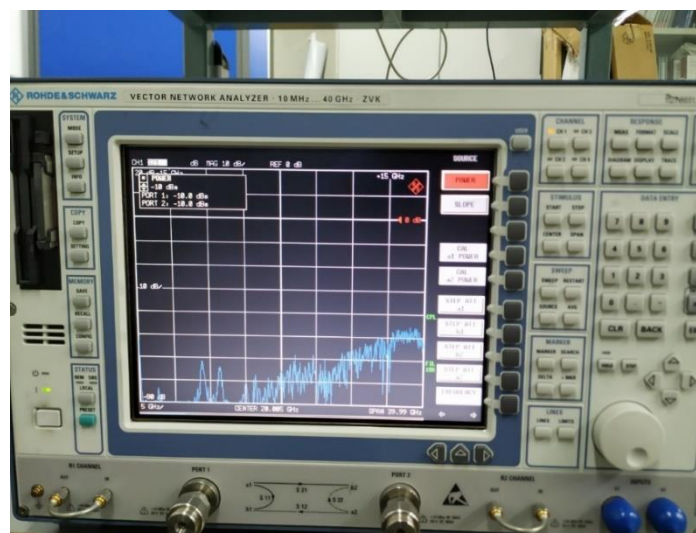


Figura 26 SOURCE Power Tx

Además, es posible seleccionar el número de puntos que se quieren a tomar para realizar las medidas correspondientes, mediante el botón “SWEEP”, situado a la derecha del analizador.



Y acto seguido, marcaremos la casilla “NUMBER OF POINTS” para indicar el número de puntos deseados, o si se prefiere realizar un barrido con un único punto marcaremos la opción “SINGLE POINT”. En nuestro caso, se ha decidido introducir 2001 puntos, que es el máximo que permite dicho dispositivo.

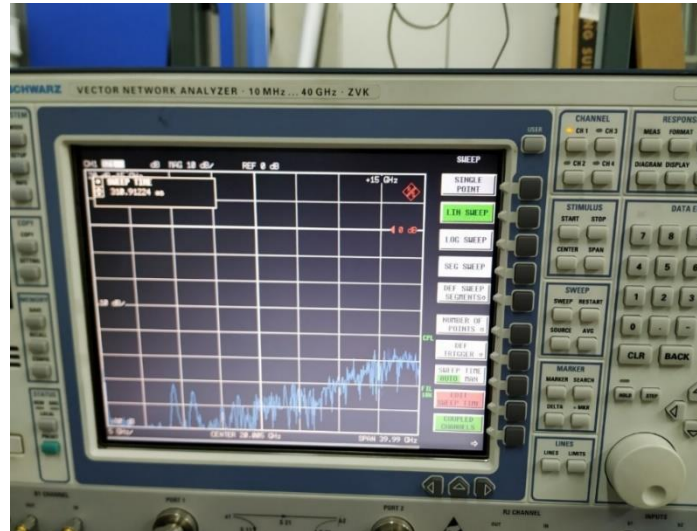


Figura 27 SWEEP

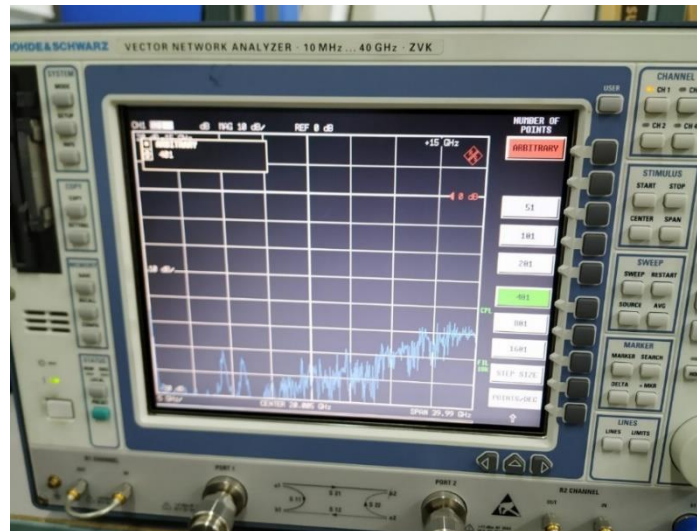


Figura 28 Number of Points



El primer paso para llevar a cabo una correcta calibración será presionar el botón “CAL”, situado en la esquina superior derecha del VNA. A continuación, se mostrará por pantalla el menú de calibración con las diferentes opciones, para empezar una nueva calibración marcaremos la casilla “START NEW CAL”.

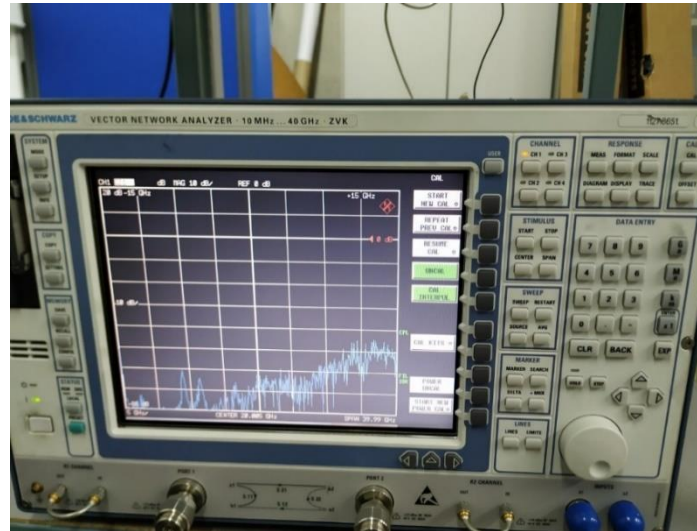


Figura 29 Start New Cal

Posteriormente, seleccionaremos “BOTH DIRECTIONS”.

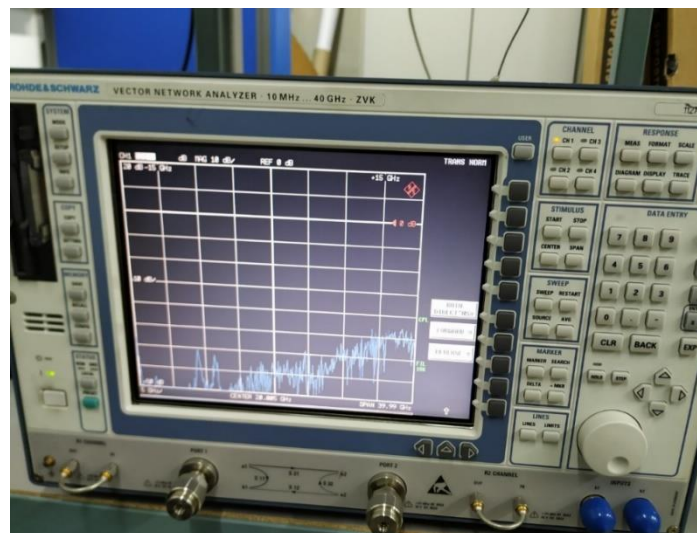


Figura 30 CAL Both Directions

El paso siguiente será marcar “TRANS NORM”.

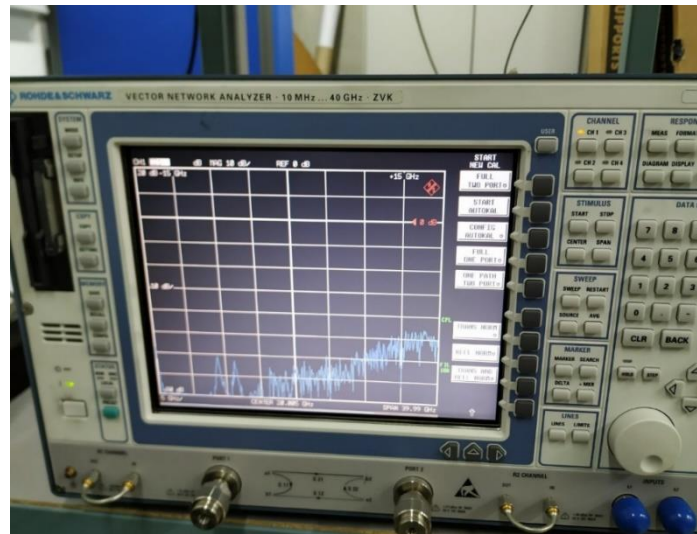


Figura 31 Trans Norm

Posteriormente, presionamos “THROUGH”, y seguidamente, seleccionamos “APPLY CAL” y pasados unos segundos, se calibrará situándose en 0 dB.

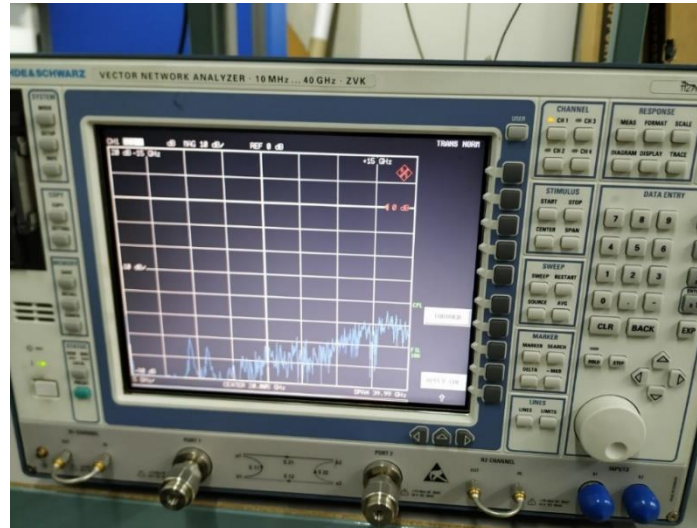


Figura 32 Through



Este paso es muy importante, debido a que por defecto los archivos que guarda el software son los correspondientes a la impresión de las gráficas directamente mediante una impresora conectada. De tal modo, debemos seleccionar “SEL ITEMS TO SAVE” y deseleccionar todos y marcar “ASCII FILE”, este archivo contendrá todos los parámetros necesarios para poder utilizarlo posteriormente en MATLAB.

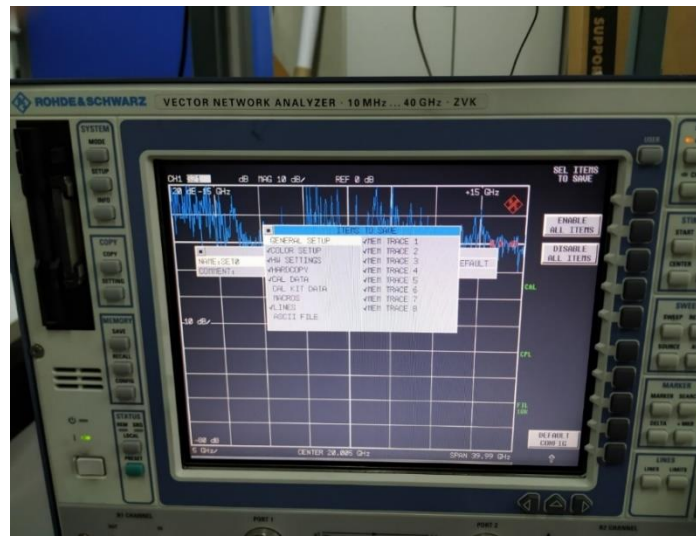


Figura 35 Select Items to Save

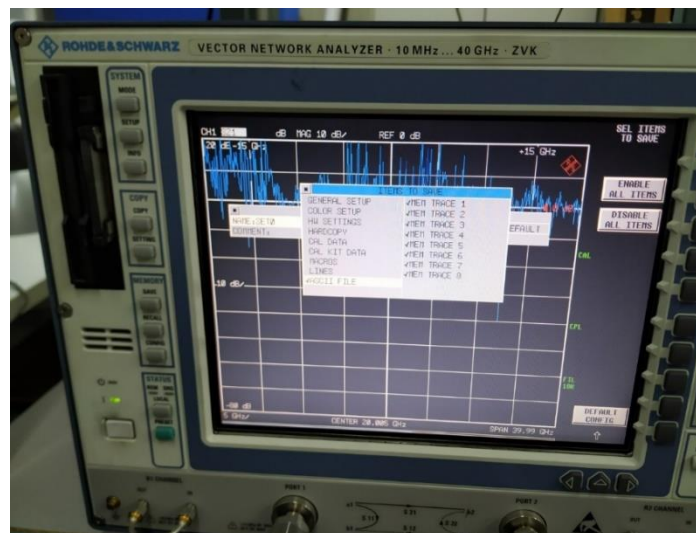


Figura 36 Select ASCII File



5. MEDIDAS EN UNA PLANTACIÓN DE CÍTRICOS

5.1. Entorno de Medida

En este apartado se muestra imágenes reales del entorno de medidas, así como la zona geográfica, las diferentes antenas y su colocación y conexión entre los equipos del sistema, las diferentes vistas tomando como referencia el transmisor y el receptor, y las medidas de cada uno de los elementos y características del entorno en el que se realizaron las medidas. En la Figura 38, se muestra una imagen desde la perspectiva satélite proporcionada por Google Maps

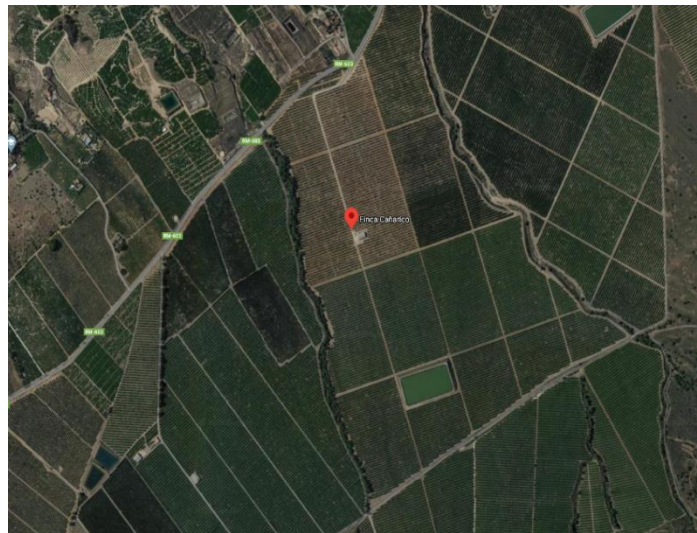


Figura 38 Imagen Vista Satélite del Entorno de Medidas

En la Figura 39, se ha aprovechado la imagen del terreno del entorno de medidas para incluir las dimensiones y diferentes distancias entre las antenas transmisora y receptora, así como, las separaciones entre árboles, anchura de los mismos, etc.



Figura 39 Imagen de las Características del Entorno

Además, se realizaron diferentes fotografías para poder mostrar las diversas posiciones de las antenas, así como, poder mostrar una visualización a pie de campo del entorno de medidas. Como se pueden apreciar tanto en las Figura 40 - 43.



Figura 40 Imagen Medición en Entorno Real



Figura 41 Imagen Distancia y Colocación de las Antenas en Entorno Real



Figura 42 Imagen de las Antenas Conectadas en Entorno Real 1



Figura 43 Imagen de las Antenas Conectadas en Entorno Real 2



5.2. Bandas de Frecuencia y Parámetros

En este apartado, se han incorporado dos tablas que recogen los principales parámetros y las características más importantes de las antenas que se han empleado en las mediciones.

GHz	Bicónica			Omnidireccional		Bocina
	800 MHz	1800 MHz	2100 MHz	3.5 GHz	28 GHz	
f0	0.8 GHz	1.8 GHz	2.1 GHz	3.5 GHz	28 GHz	
fstart	0.55 GHz	1.55 GHz	1.85 GHz	3 GHz	27 GHz	
fstop	1.05 GHz	2.05 GHz	2.35 GHz	4 GHz	29 GHz	
BWR	500 MHz	500 MHz	500 MHz	1 GHz	2 GHz	
BW	0,99MHz	0,99MHz	0,99MHz	0,49MHz	0,99MHz	
N	501	501	501	2001	2001	

Tabla 1 Parámetros Resolución Temporal


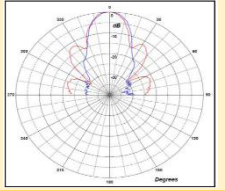
ANTENA	IMAGEN	RANGO DE FRECUENCIA A	GANANCIA	ANCHO DE HAZ PLANO E Y H
BICÓNICA		500 MHz - 3 GHz	-1.5....+1.5 dBi	
OMNI		0.8-40 GHz	-2.2 a 1 dBi	
BOCINA		26.5 to 40 GHz	17.7 to 20.9 dBi	

Tabla 2 Tabla con los Parámetros de las Antenas



FRECUENCIA	SPAN	N	IF	Pt (dBm)	Rango Dinámico
800 MHz	500 MHz	2001	10 KHz	-20	
1800 MHz	500 MHz	2001	10 KHz	-20	100
2100 MHz	500 MHz	2001	10 KHz	-20	
3.5 GHz	1 GHz	2001	10 KHz	-20	90
28 GHz	2 GHz	2001	10 KHz	-10	65

Tabla 3 Configuración de los Parámetros

5.2.1. Pérdidas

En este apartado se plasman los resultados obtenidos de las simulaciones en las que se analiza los diferentes valores de las pérdidas, en función de las diferentes condiciones propuestas para el canal de propagación. Mostrando valores en las gráficas cuyos ejes se corresponden con la distancia para el eje de abscisas y el valor de las pérdidas se corresponde con el eje de ordenadas. En todas las gráficas se incluyen el valor de pérdidas de las medidas, las pérdidas en espacio libre, y los modelos de regresión lineal FI y CI cuyas pendientes son también representadas. A continuación, se explican dichos métodos.

5.2.1.1. Método CI

El primero de los dos tipos de ajuste que se ha empleado para un modelado de los resultados obtenidos en las mediciones es el Modelo de ajuste CI, y se puede definir mediante la expresión [13] (4.1):

$$PL(d)[dB] = FSPL(d_0) + 10n \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_{\sigma SF} \quad (4.1)$$

Esta ecuación (4.1) contiene diferentes términos, el primero que describiremos será el término FSPL, el cual se define como una referencia de las pérdidas de propagación en espacio libre a la distancia d_0 , siendo normalmente 1 metro. Otro de los términos es “n”, dicho término es el único coeficiente y que determina las pérdidas de propagación con respecto a la distancia por década. Por último, el término $X_{\sigma SF}$, es una variable gaussiana de media cero y con una desviación estándar de σSF (dB).



5.2.1.2. Método FI

El segundo de los dos tipos de ajuste que se ha empleado para un modelado de los resultados obtenidos en las mediciones es el Modelo de ajuste FI, y se puede definir mediante la expresión [13] (4.2):

$$PL(d)[dB] = \alpha + 10\beta \cdot \log(d) + X_{\sigma SF} \quad (4.2)$$

Dicha ecuación (4.2) contiene dos coeficientes de ajuste. Además, para este modelo, “d” tiene que ser mayor o igual a 1 metro. El parámetro α debe estar expresado en dB y es el que nos permite realizar el ajuste de las medidas, mientras que β , representa la pendiente que caracteriza las pérdidas de propagación y depende de la distancia. Por último, el parámetro $X_{\sigma SF}$ es igual al descrito en el modelo de ajuste CI.

Al mismo tiempo, para poder haber realizado todo lo anterior, se ha llevado a cabo un método de regresión por mínimos cuadrados, en el que se han utilizado todas las medidas obtenidas para cada uno de los casos de estudio, estos resultados se presentan a continuación.

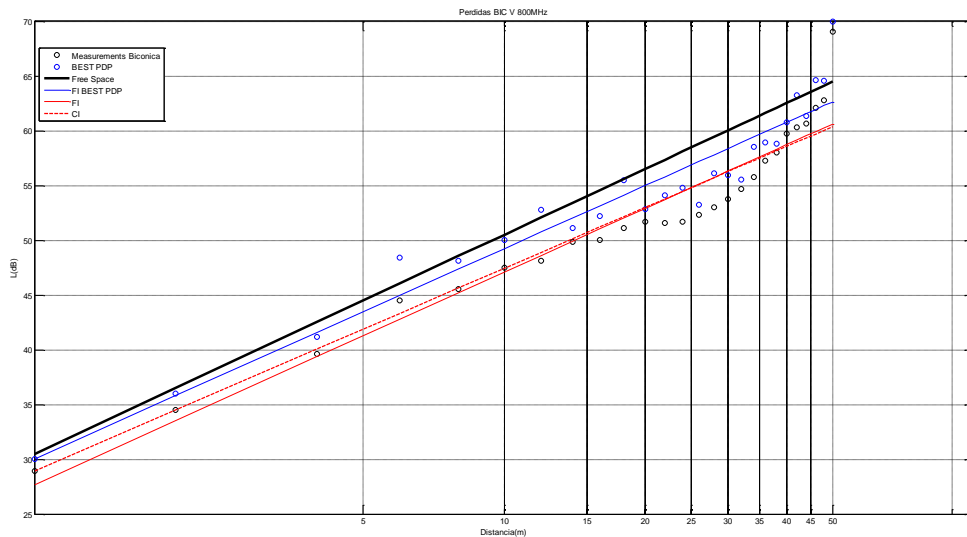


Figura 44 Pérdidas Bicónica Polariz V 800 MHz



En la figura 44, se han representado los parámetros obtenidos al utilizar las antenas bicónicas y en polarización vertical, a una frecuencia de trabajo de 800 MHz. Se puede observar como todas las pendientes tienen la misma tendencia. Además, conforme aumenta la distancia, como es lógico aumentan las pérdidas, aunque hay una mayor variación respecto unas a otras.

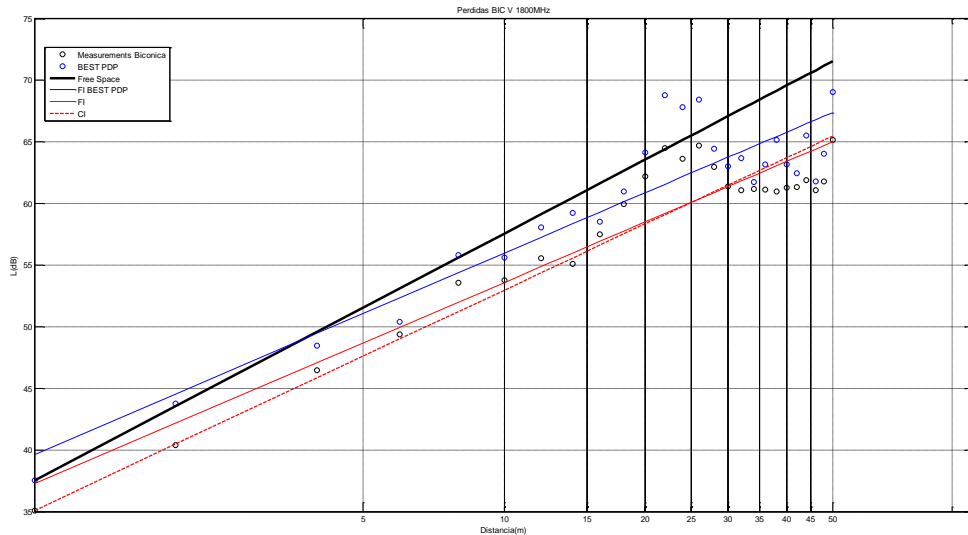


Figura 45 Pérdidas Bicónica Polariz V 1800 MHz

En la figura 45, se ha empleado la misma metodología que en la anterior figura, solo se ha aumentado la frecuencia, pasando de 800 a 1800 MHz. Se han representado los valores de las pérdidas según el modelo empleado, así como las pendientes. Las cuales, aumentan todas en función de la distancia, con pequeñas variaciones producidas por señales reflejadas en los diferentes elementos del entorno en el que se hicieron las medidas.

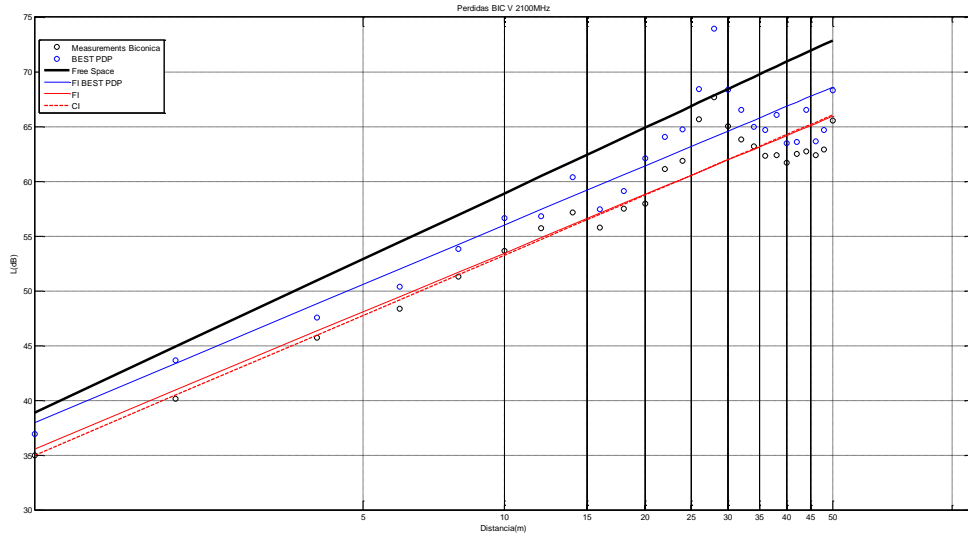


Figura 46 Pérdidas Bicónica Polariz V 2100 MHz

En la figura 46, se puede observar que aunque se haya aumentado la frecuencia, como la diferencia es tan pequeña, apenas se aprecian cambios relevantes.

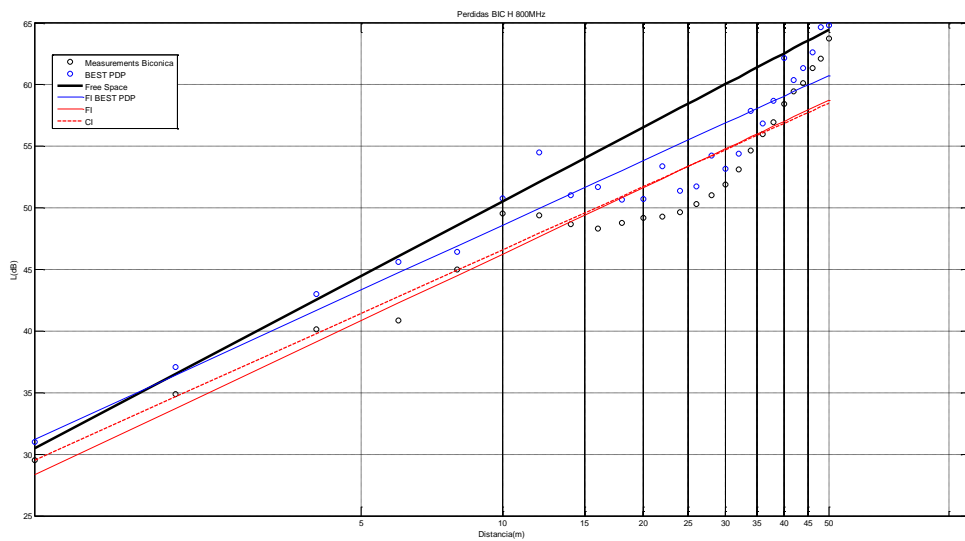


Figura 47 Pérdidas Bicónica Polariz H 800 MHz

En la figura 47, se han empleado las mismas antenas, repitiendo los parámetros anteriores, únicamente modificando la polarización al colocar las antenas de manera diferente, pasando ésta a ser polarización horizontal. Siguiendo, viendo las gráficas anteriores la misma tendencia al aumentar las pérdidas con la distancia.

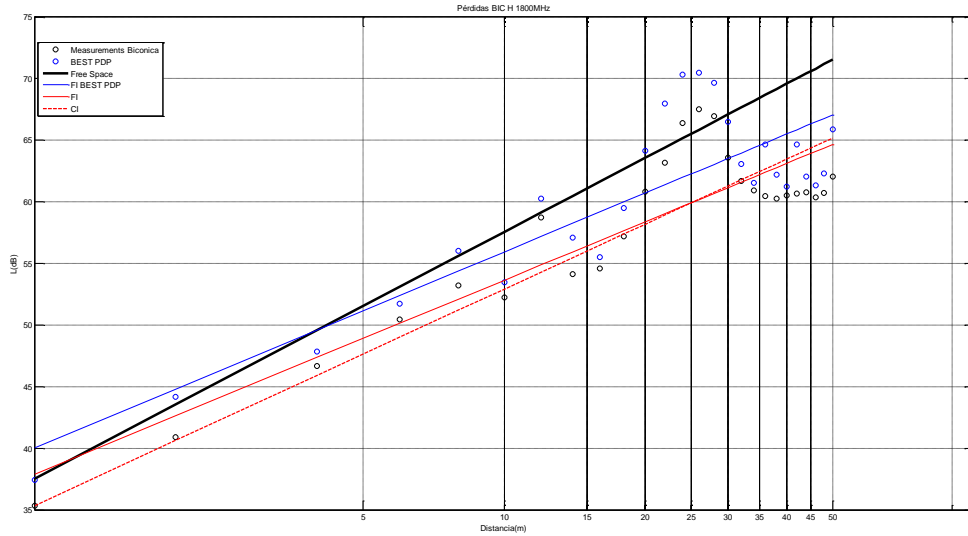


Figura 48 Pérdidas Bicónica Polariz H 1800 MHz

En la figura 48, se produce un cambio en donde los valores obtenidos a 1 metro de distancia se ven alterados y provocando que las pendientes cambien.

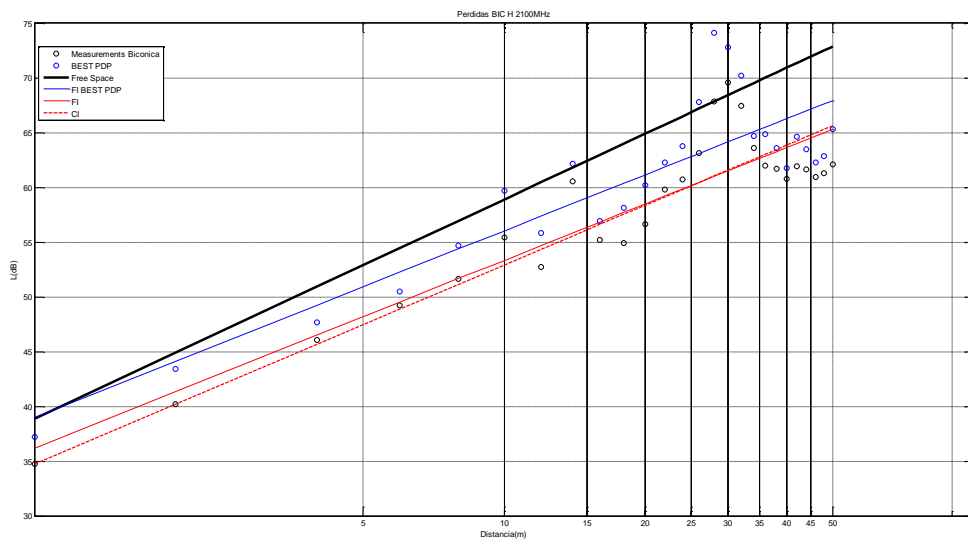


Figura 49 Pérdidas Bicónica Polariz H 2100 MHz

En esta figura 49, se puede observar que se mantiene la misma tendencia que la que se ha mostrado anteriormente, siguiendo aumentando las pérdidas en función del incremento de la distancia.

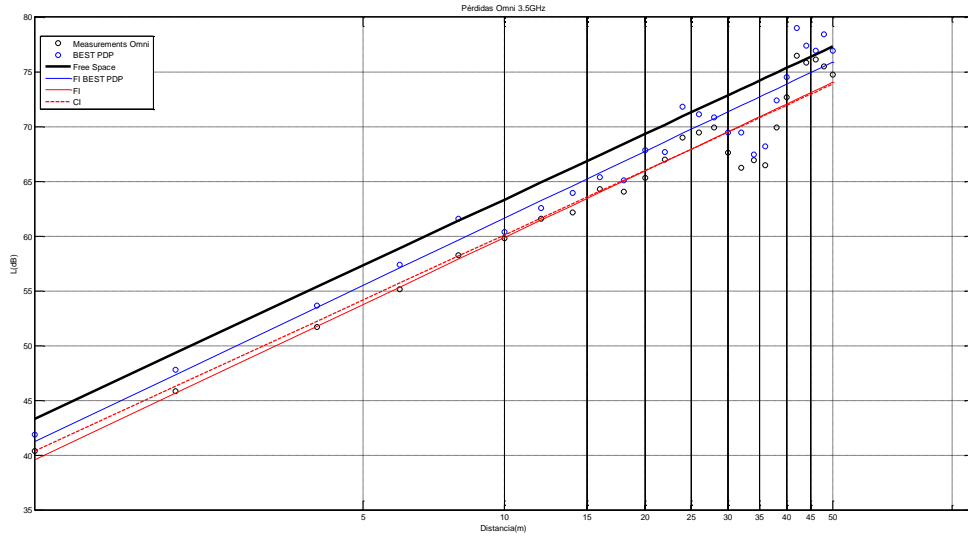


Figura 50 Pérdidas Omni 3.5 GHz

En la figura 50, se han sustituido las antenas empleadas anteriormente, por unas antenas omnidireccionales, y la frecuencia se ha aumentado hasta los 3.5 GHz. Se puede apreciar, como aunque se han modificado las antenas, la tendencia de las pendientes y los valores de las pérdidas para cada modelo se sigue manteniendo.

Frecuencia	Modelo Antena	CI			FI		
		L(1m)	n	σ	L(1m)	n	σ
800 MHz	Bicónica V	28,9	1.85	2.327	27,7	1.93	2.294
	Bicónica H	29,5	1.70	2.438	28,3	1.79	2.407
1800 MHz	Bicónica V	35,0	1.78	2.431	37,2	1.63	2.330
	Bicónica H	35,3	1.75	3.346	37,8	1.57	3.245
2100 MHz	Bicónica V	34,9	1.83	2.161	35,5	1.78	2.152
	Bicónica H	34,7	1.81	3.205	36,2	1.71	3.169
3.5 GHz	Omnidireccional	40,3	1.97	1.988	39,5	2.03	1.970

Tabla 4 Resultados Obtenidos para cada Antena y Frecuencia de Trabajo

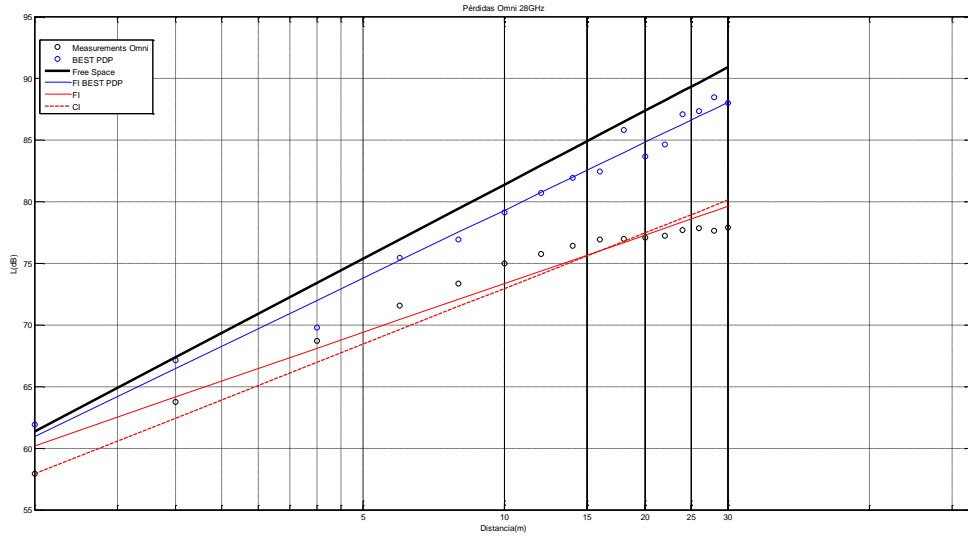


Figura 51 Pérdidas Omni 28 GHz

En la figura 51, se representan las pérdidas obtenidas al aumentar la frecuencia a 28 GHz, y como cabría de esperar, se puede observar grandes variaciones comparando esta gráfica con las anteriores, ya que está directamente relacionada la frecuencia con las pérdidas, sobre todo a mayores distancias.

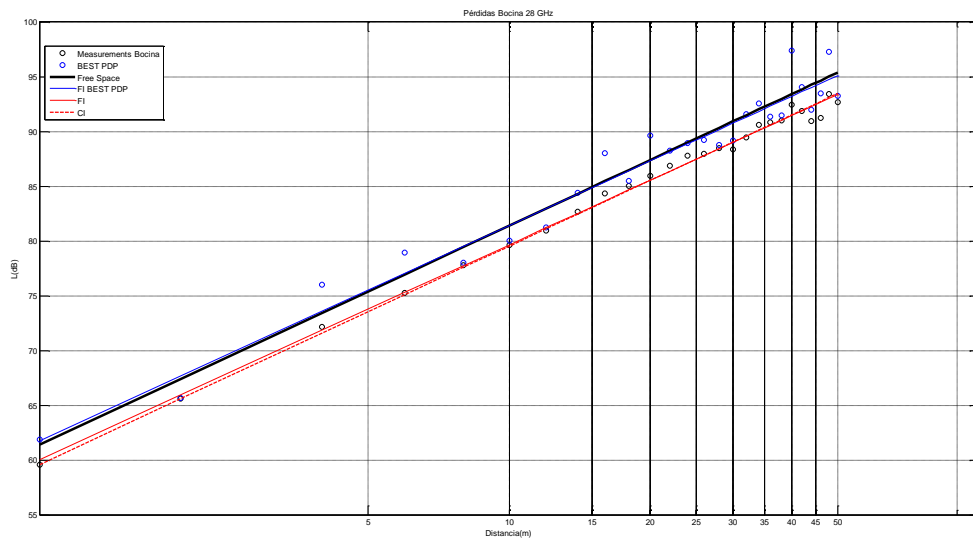


Figura 52 Pérdidas Bocina 28 GHz



En la figura 52, se han sustituido nuevamente las antenas, por otras de tipo bocina, las cuales tienen una mayor directividad. Se puede apreciar como las pendientes son prácticamente idénticas y no hay grandes variaciones respecto a unos valores con otros, esto es debido a que en la trayectoria de las antenas no se incluyen tantas reflexiones indeseadas debido a que más rectilínea.

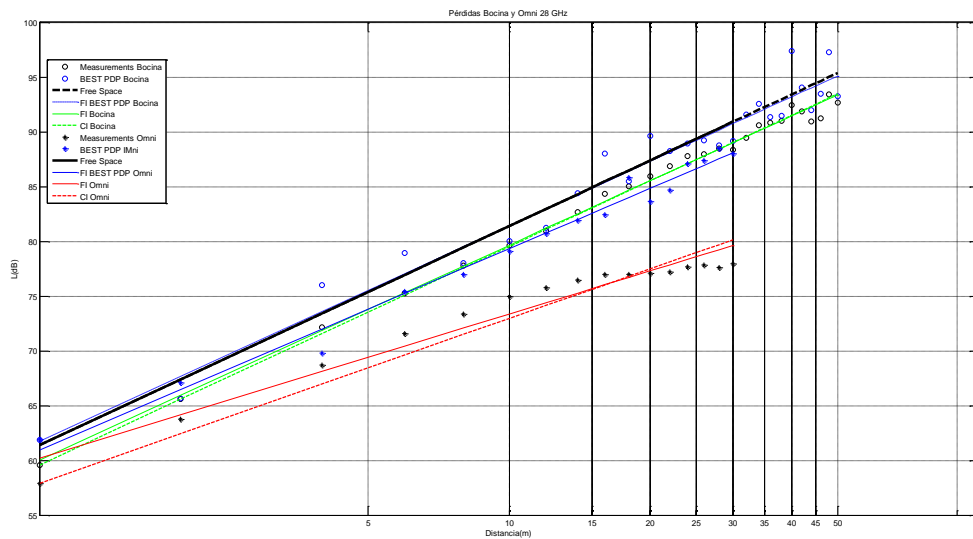


Figura 53 Comparación Pérdidas Bocina y Omni 28 GHz

Por último, en la figura 53, se ha representado los resultados obtenidos por antenas diferentes, las omnidireccionales y las directivas, para poder comparar y apreciar de la mejor manera posible cual es la diferencia entre ellas plasmada en los resultados obtenidos a 28 GHz.

Frecuencia	Modelo Antena	CI			FI		
		L(1m)	n	σ	L(1m)	n	σ
28 GHz	Omnidireccional	57,9	1.50	1.461	60,1	1.31	1.193
	Bocina	59,5	1.99	0.581	60,0	1.96	0.563

Tabla 5 Comparación de Resultados Bocina VS Omni



5.2.2. Perfiles de Retardo (PDP)

En este apartado se plasman los resultados obtenidos de las simulaciones en las que se analiza los diferentes valores de la potencia del perfil de retardo (PDP), en función de las diferentes condiciones propuestas para el canal de propagación. Mostrando valores en las gráficas cuyos ejes se corresponden con la distancia para el eje de abscisas y el valor de la PDP se corresponde con el eje de ordenadas.

Una vez más, mencionar que todos los códigos para la realización de las simulaciones han sido previamente revisados y todos los resultados obtenidos han sido comparado con los resultados de diferentes publicaciones cuya importancia es mayúscula.

Para la representación de los resultados, se ha optado por incluir las tres mediciones más relevantes, cuyas distancias se corresponde con la más cercana, la intermedia y la más lejana correspondiente a 1 metro, 24 metros y 50 metros, respectivamente. Ya que, si se hubieran incluido todos los resultados, las gráficas apenas serían óptimas para su correcta visualización.

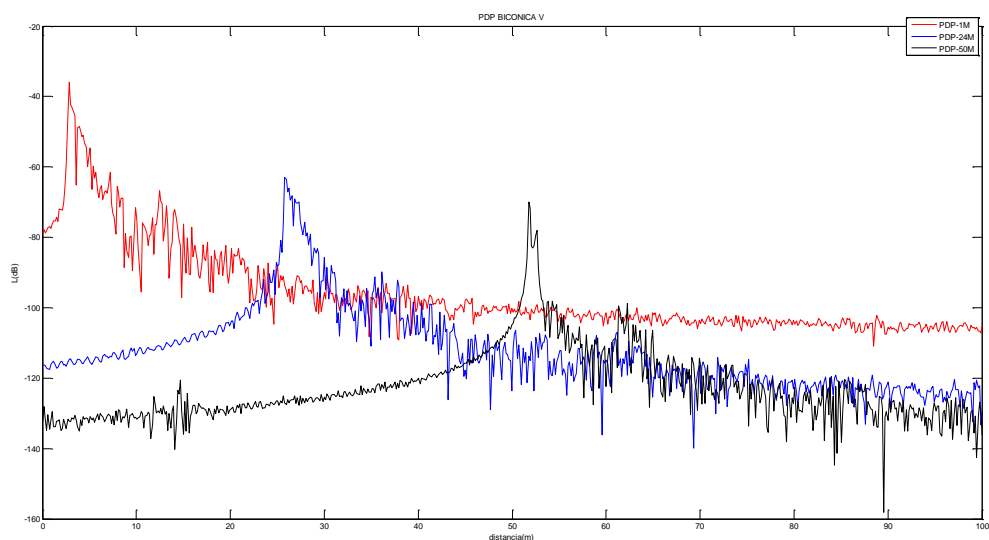


Figura 54 Power Delay Profile Bicónica Polariz V

En la figura 54, se puede observar la potencia de perfil de retardo para las antenas bicónicas colocadas para que la polarización sea vertical. Como cabría de esperar, el máximo de potencia recibida es menor conforme se aumenta la distancia de separación entre las antenas transmisora y receptora.

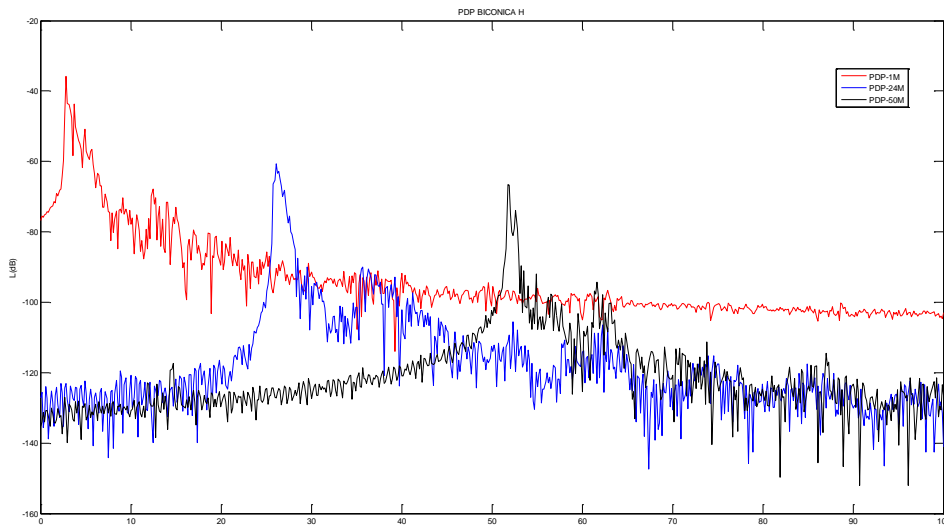


Figura 55 Power Delay Profile Bicónica Polariz H

En la figura 55, se han mostrado los resultados correspondientes a las antenas bicónicas, pero cambiando la colocación de las antenas para que la polarización sea horizontal. Se puede apreciar como los valores obtenidos son muy similares a los anteriores, por lo que se podría afirmar que el haber modificado la polarización de ambas antenas no ha tenido apenas impacto a la hora de obtener los valores de la PDP.

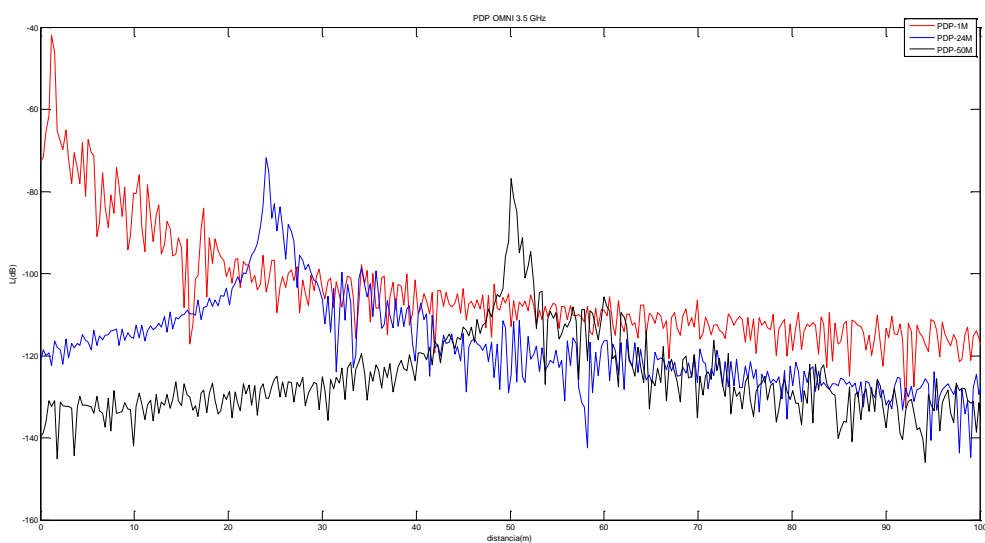


Figura 56 Power Delay Profile Omni 3.5 GHz



En la figura 56, se han mostrado los valores de la PDP obtenidos para las mediciones en las que se ha empleado antenas omnidireccionales y a una frecuencia de 3.5 GHz. Se puede apreciar como los valores del máximo de potencia van disminuyendo conforme aumenta la distancia. Además, destacar como a partir de los 24 metros la variación de disminución no es tan grande como en los primeros metros de distancia.

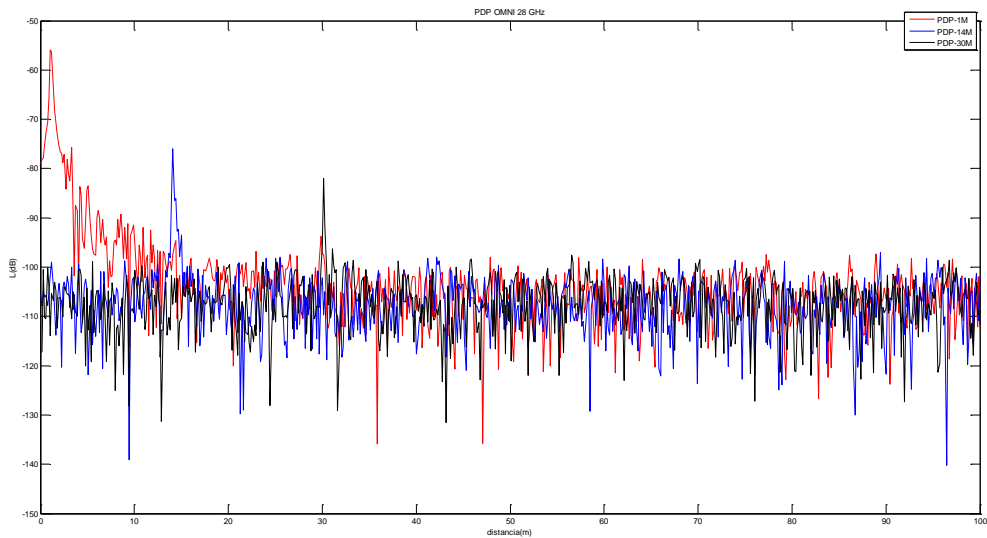


Figura 57 Power Delay Profile Omni 28 GHz

En la figura 57, se muestran los resultados de la PDP a una frecuencia de 28 GHz, para las antenas omnidireccionales, y comparándolas con las anteriores, se puede ver como siguen la misma tendencia a disminuir con la distancia, y también, como los valores han disminuido al aumentar la frecuencia de trabajo, al estar relacionada directamente con ella. Para este caso, solo se han mostrado los resultados hasta los 30 metros de distancia, ya que, a partir de ésta, se hacían inservibles.

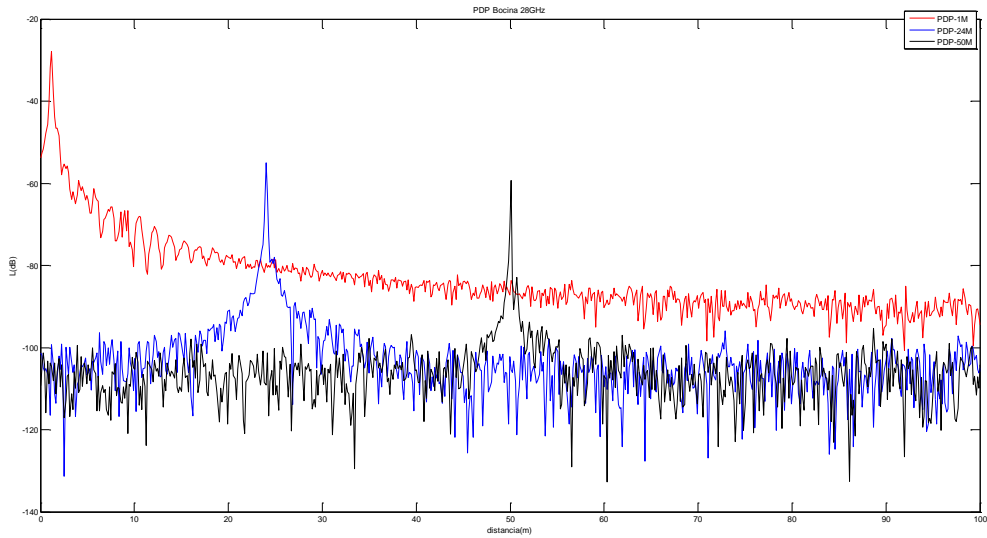


Figura 58 Power Delay Profile Bocina 28 GHz

En la figura 58, se han mostrado los resultados obtenidos de la PDP, de las mediciones en las que se han empleado las antenas bocina, las cuales presentan un diagrama de radiación más directivo. Se puede observar, como los valores de potencia obtenidos son mayores. Además, destacar que siguen manteniendo la misma tendencia, cuyos valores disminuyen drásticamente en los primeros metros, y luego esta variación es bastante menor al comparar distancias mayores entre sí.



5.2.3. RMS Delay Spread

En este apartado se plasman los resultados obtenidos de las simulaciones en las que se analiza los diferentes valores de τ_{rms} , en función de las diferentes condiciones impuestas al canal de propagación y comparando dichas condiciones entre sí. Mostrando los valores en el gráficas en donde el eje de abscisas se corresponde con la distancia de separación entre el transmisor y receptor, mientras que el eje de ordenadas se corresponde con el valor obtenido de τ_{rms} , para cada distancia.

Además, comentar que previamente a obtener las simulaciones específicas, se ha comprobado que los códigos para el estudio del canal eran los correctos, comparándolos con los resultados obtenidos en otras publicaciones donde muestren valores relativos de τ_{rms} .

En este apartado se ilustra los diferentes valores de τ_{rms} , de los cuales se analizará la influencia que tienen:

Por un lado, se han dispuesto diferentes antenas dependiendo de la frecuencia de trabajo, entre estas antenas encontramos bicónicas, bocinas y omnidireccionales. Situadas a 1,50 metros del suelo, sobre un mástil.

Por otro lado, la distancia se ha ido variando desde la más cercana, correspondiente a 1 metro, hasta la más lejana tratándose de 50 metros, empleando cable de fibra óptica de hasta 100 metros de longitud.

Asimismo, a la hora de representar gráficamente los valores obtenidos, se han colocado tres márgenes para poder mostrar con más claridad como varían los resultados.

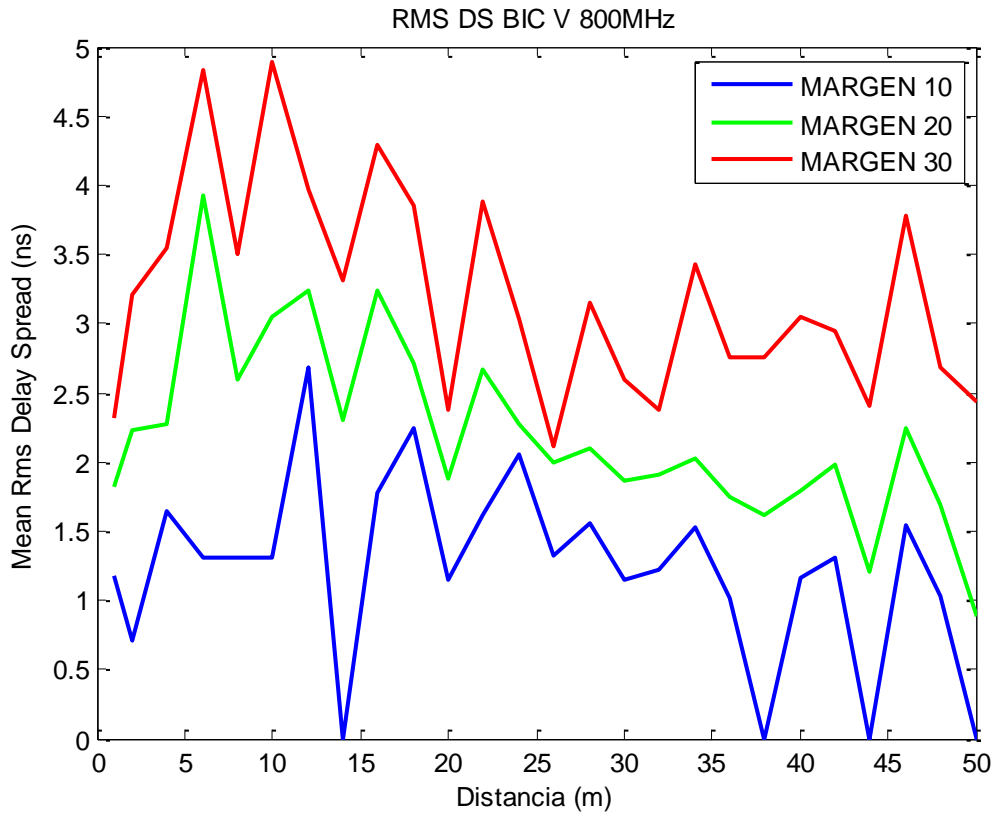


Figura 59 RMS Delay Spread Bicónica Polariz V 800 MHz

A partir de la figura 59, se puede observar que la dispersión del retardo es mayor cuanto mayor es el margen escogido, esto es debido a que se incluyen mayores picos de la PDP, que pueden producirse por reflexiones que no son deseadas. Además, hay tendencia que a la distancia de 1 metro el valor de la dispersión del retardo sea menor, ya que las componentes tienen menor camino que recorrer.

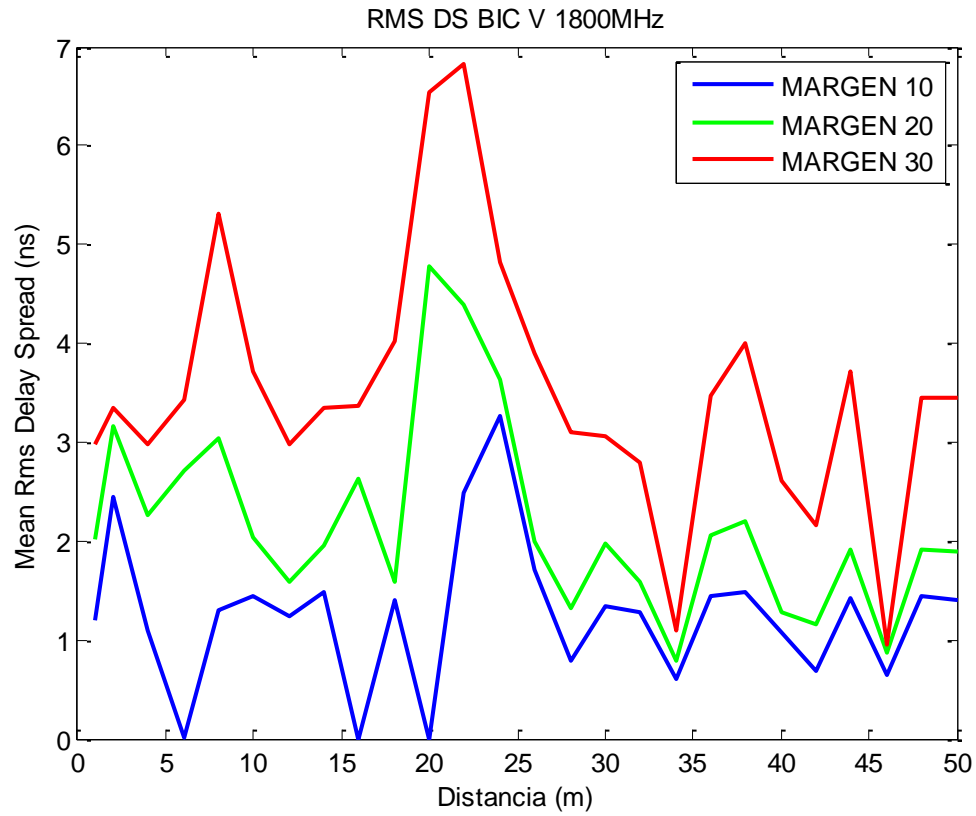


Figura 60 RMS Delay Spread Bicónica Polariz V 1800 MHz

En la figura 60 se puede observar, como se reafirma lo mencionado anteriormente respecto a los valores obtenidos en función del margen aplicado. También se aprecia como aparece algún pico que es debido a alguna reflexión no deseada.

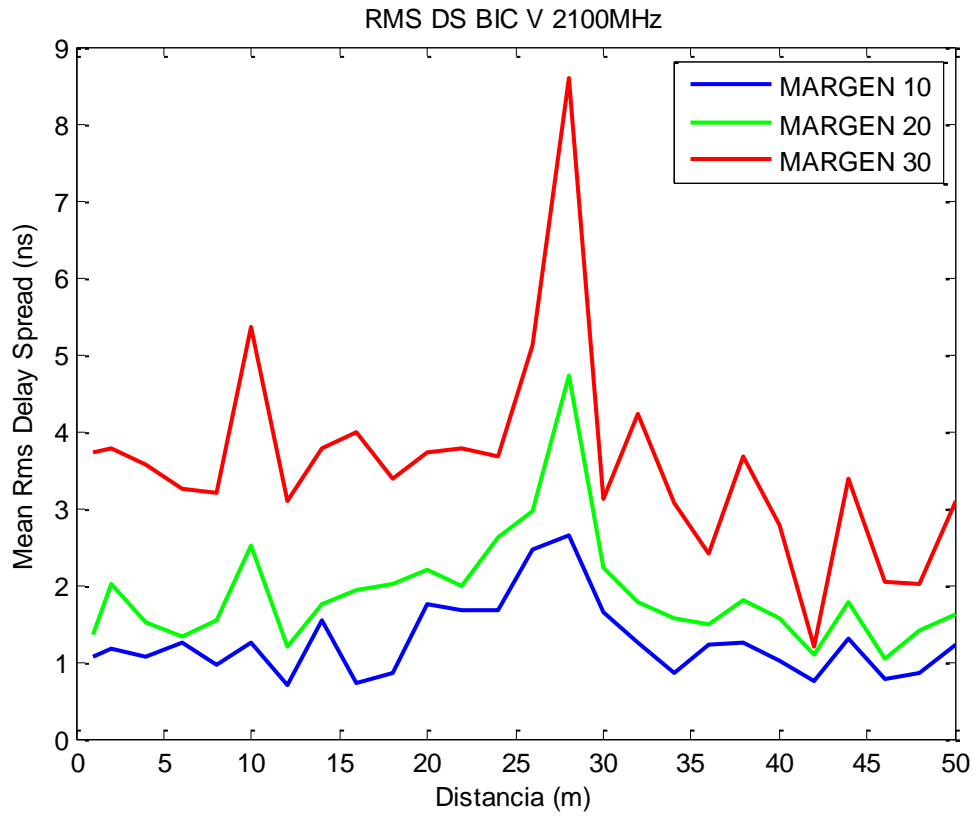


Figura 61 RMS Delay Spread Bicónica Polariz V 2100 MHz

En la figura 61, se puede apreciar que los valores son similares a los representados en las figuras anteriores, por lo que, para estas condiciones, el poco incremento de frecuencia no tiene un gran impacto.

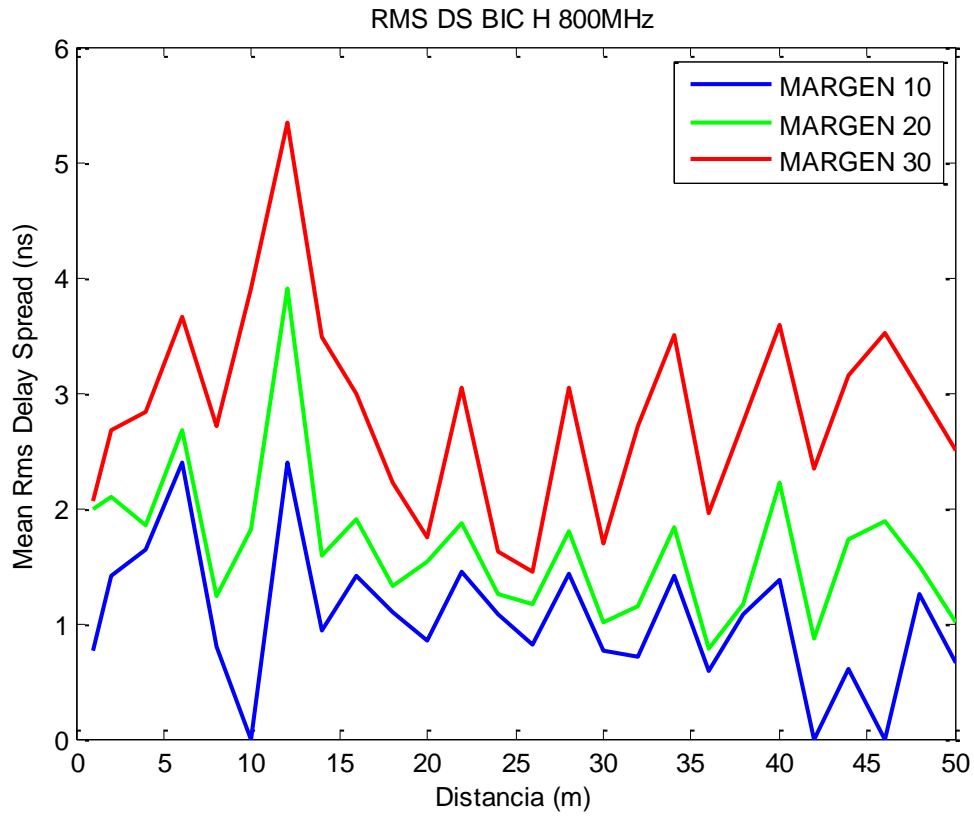


Figura 62 RMS Dealy Spread Biconica Polariz H 800 MHz

A partir de esta Figura 62, se ha cambiado la polarización de las antenas, y pasa a ser de vertical a horizontal, manteniendo el mismo rango de frecuencias. Y se puede apreciar como los valores de la dispersión de retardo son muy similares.

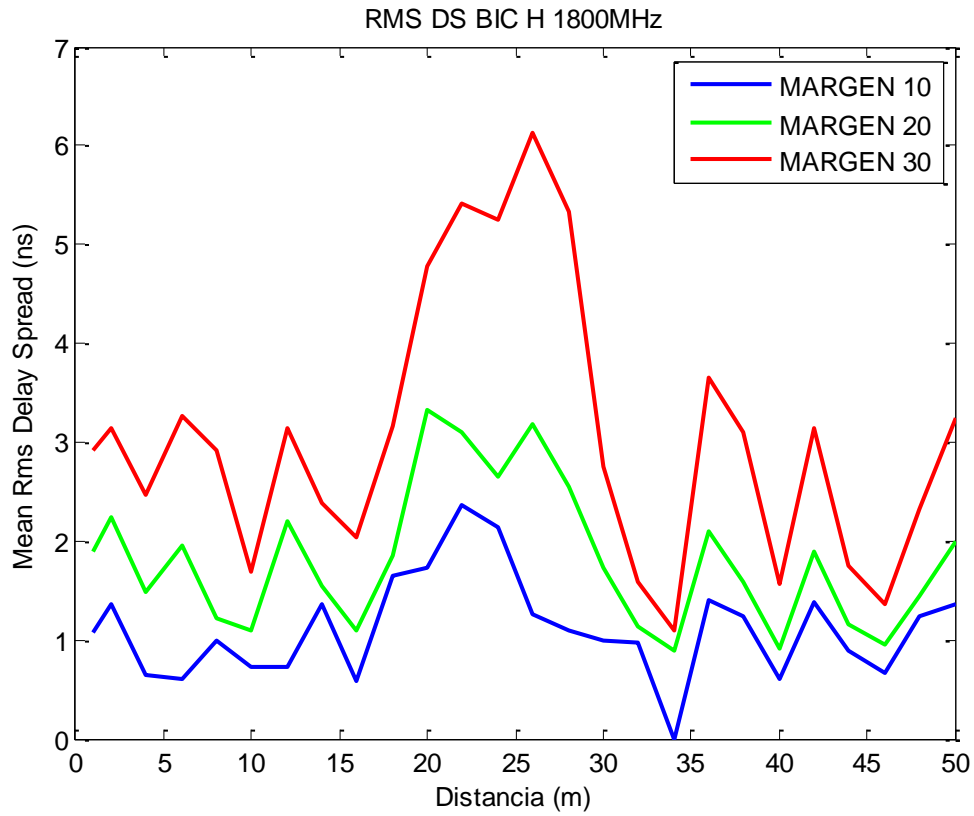


Figura 63 RMS Delay Spread Bicónica Polariz H 1800 MHz

En la figura 63, se puede observar la misma tendencia que en las gráficas anteriores, excepto para valores de distancia intermedias, apreciándose varios picos, posiblemente debidos a reflexiones indeseadas.

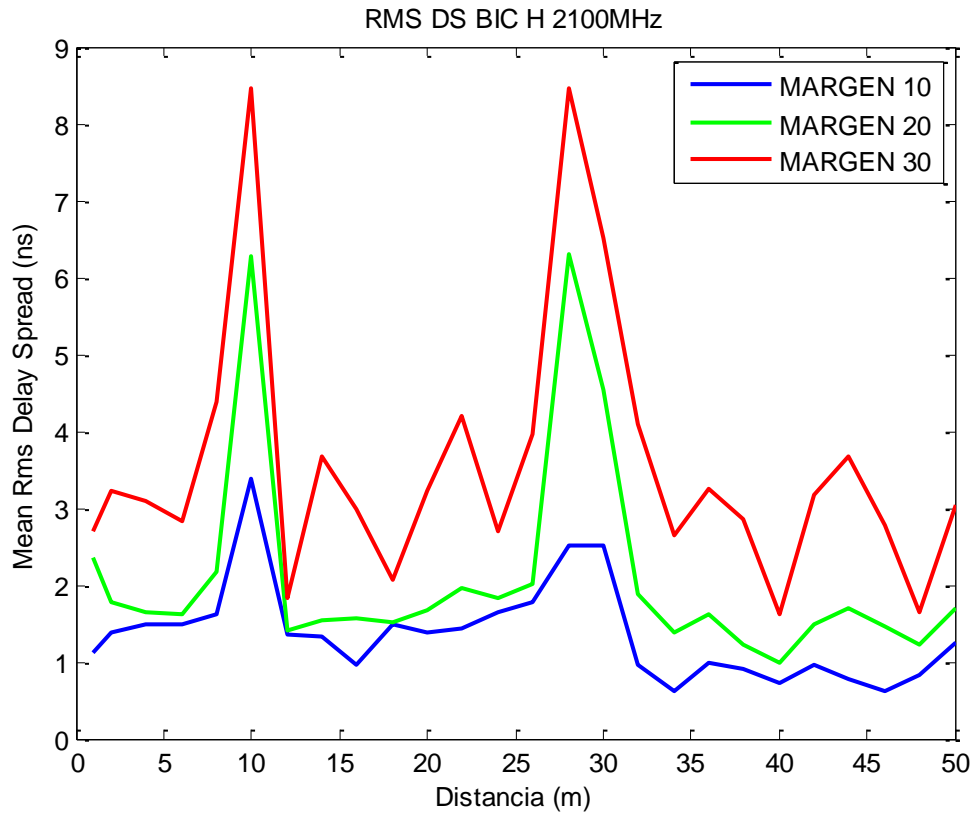


Figura 64 RMS Delay Spread Bicónica Polariz H 2100 MHz

A partir de la figura 64, se sigue manteniendo la misma tendencia que anteriormente. Por otro lado, también se observa varios picos en los valores a 10 y 28 metros de distancia, posiblemente por interferencias provocadas por el entorno.

Una vez comentadas las gráficas correspondientes a las antenas bicónicas cuyo rango de frecuencias ha ido desde los 800 MHz hasta 2100 MHz y se ha comparado los valores obtenidos modificando la polarización de las antenas transmisora y receptora. Se puede afirmar, que apenas hay cambios notables al modificar la polarización, y que el principal impacto que han sufrido ha sido por el que depende del margen aplicado.

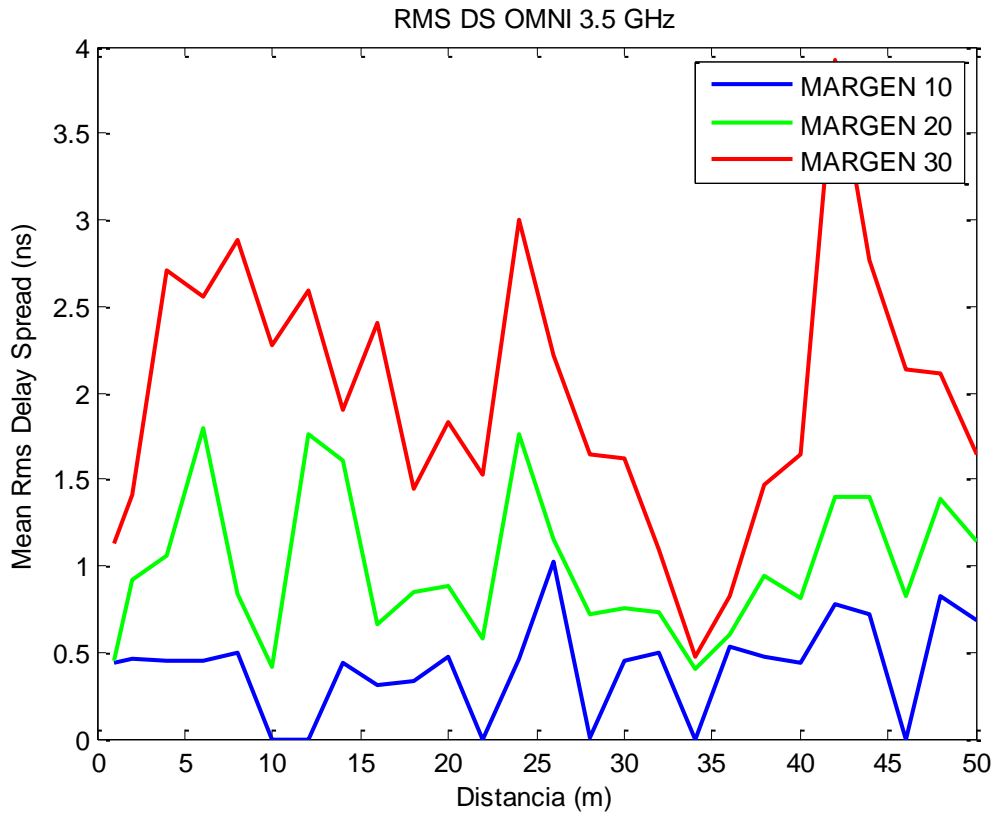


Figura 65 RMS Delay Spread Omni 3.5 GHz

En la figura 65 se ha cambiado las antenas, y se han empleado antenas omnidireccionales a una frecuencia de 3.5 GHz. Se puede observar como los valores principalmente se han visto reducidos en general, salvo con algunos picos debido a interferencias.

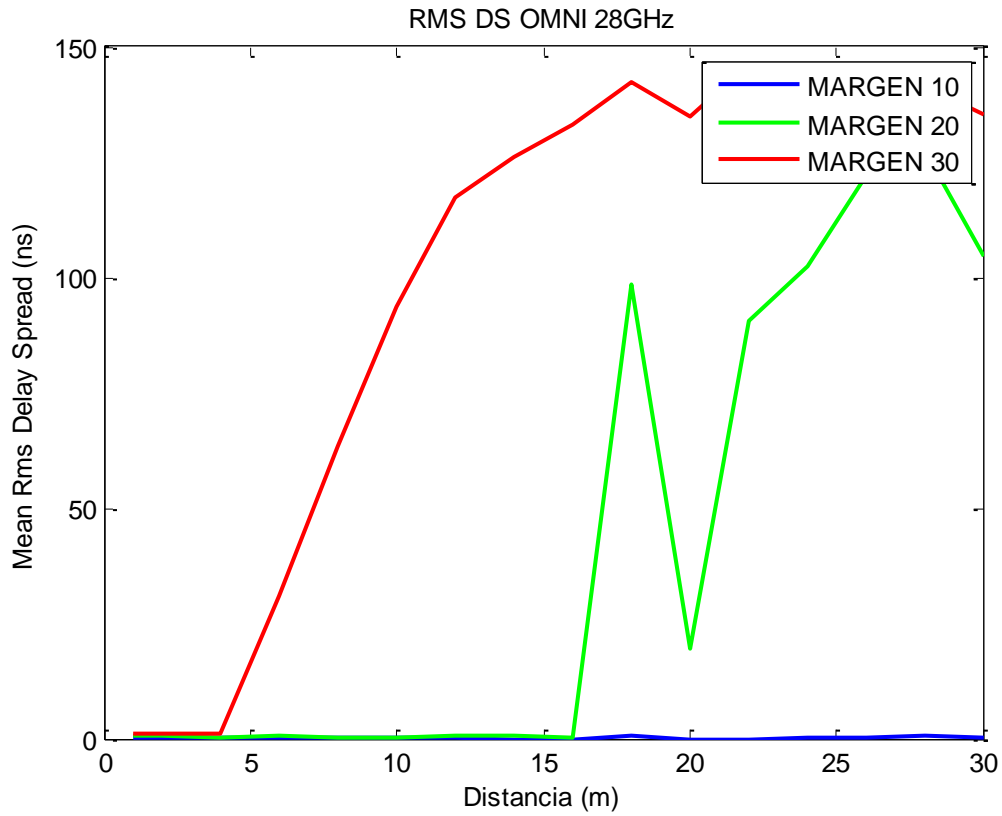


Figura 66 RMS Delay Spread Omni 28 GHz

La figura 66, se corresponde con mediciones realizadas a 28 GHz, empleando antenas omnidireccionales. Se puede apreciar como dependiendo del margen aplicado, los valores de la dispersión del retardo se disparan, haciendo nulos los valores obtenidos aplicando el margen de 10. Por lo que, se afirma que, con estas condiciones en las mediciones, a partir de los 15 metros y con un margen de 20 dB, los valores obtenidos no sirven.

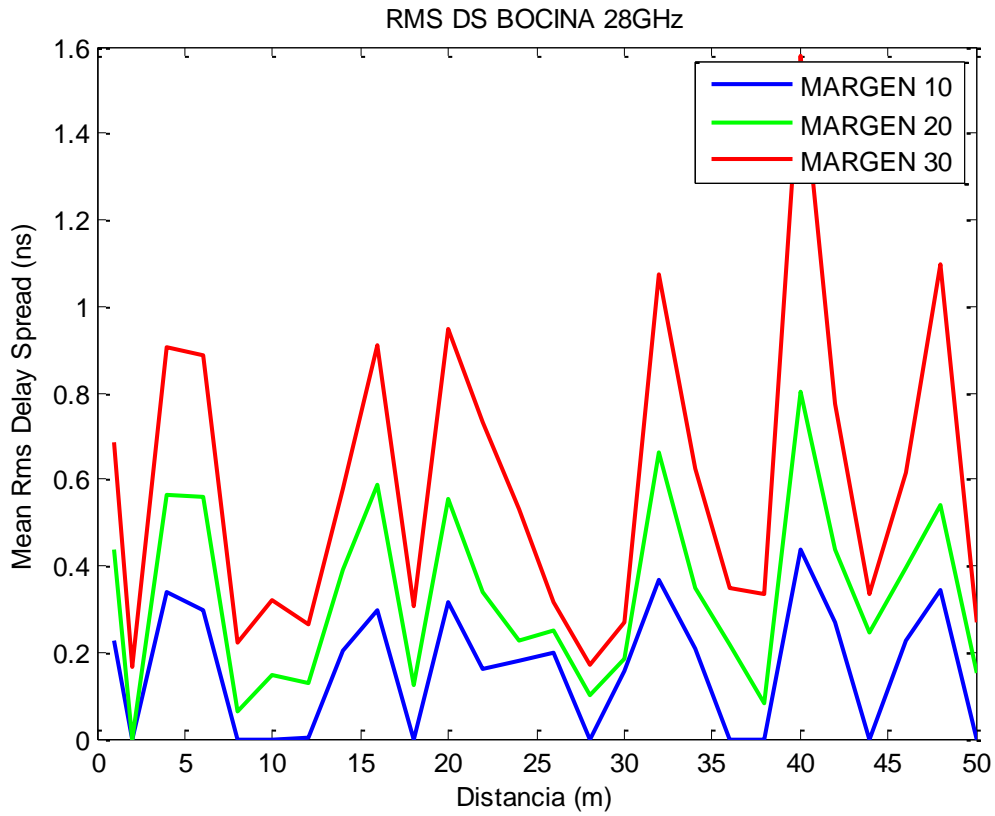


Figura 67 RMS Delay Spread Bocina 28 GHz

En la figura 67, se representa los valores obtenidos de la dispersión de retardo, utilizando antenas bocina, es decir, con un diagrama de radiación directivo y a una frecuencia de 28 GHz. Se puede apreciar como efectivamente, los valores obtenidos son menores en general con diversos picos que se producen normalmente, debido a las condiciones del entorno.

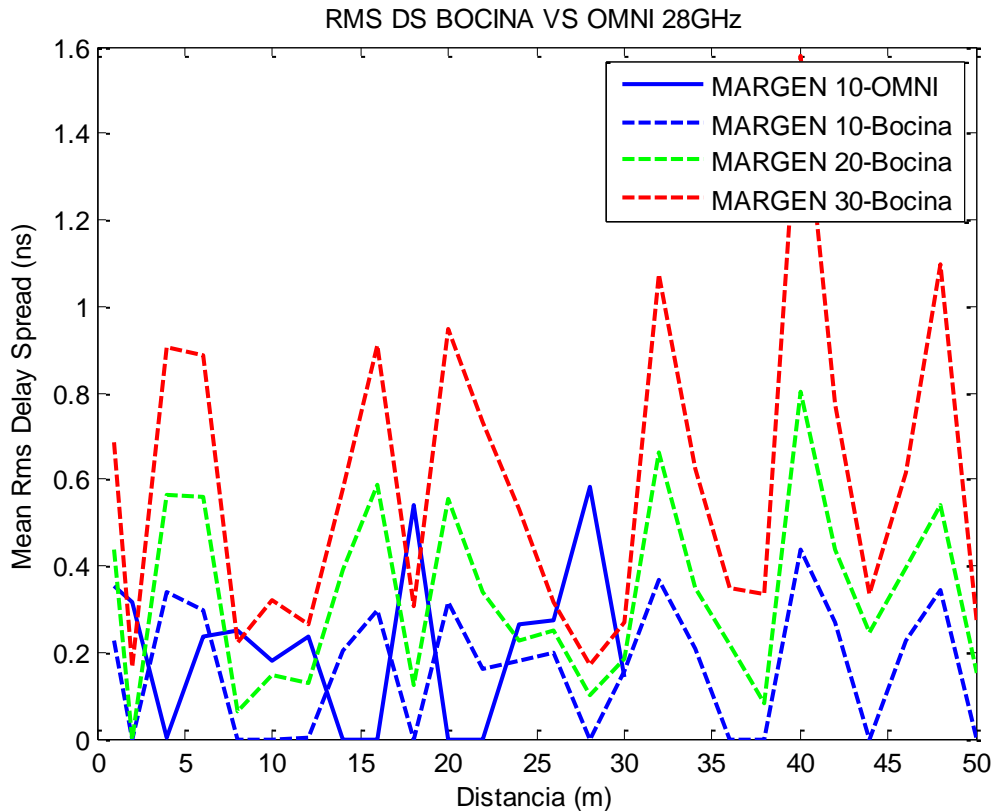


Figura 68 RMS Delay Spread Comparación Bocina y Omni 28 GHz

En la figura 68, se ha realizado una comparación de los valores obtenidos para las antenas bocina y omnidireccional, además, para que no se produjese un gran salto en los valores de los resultados y provocase que muchos datos quedaran sin visualizarse correctamente, se ha decidido solo mostrar para los resultados correspondientes a las antenas omnidireccionales, solo aquellos a los que se le han aplicado un margen de 10 dB.

Por otro lado, se puede apreciar como los valores de ambos tipos de antenas son similares para un margen de 10 dB, mientras que si aumentamos el margen los valores para la antena omnidireccional se disparan a partir de una distancia de 30 metros, por lo que a esta frecuencia y para poder obtener un mayor rango de resultados para su estudio posterior es más conveniente emplear antenas directivas.



6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS

En este capítulo se resumen las principales conclusiones obtenidas a partir de los resultados de los estudios presentados en los capítulos anteriores en torno a la caracterización del estudio del canal radio en un entorno de plantaciones de cítricos. Así mismo, se detallan las posibles líneas de investigación en el campo del modelado del canal de propagación en dicho entorno de plantación de cítricos que podrían desarrollarse más allá del ámbito del presente Trabajo Fin de Máster.

6.1. Conclusiones

Una vez analizados los resultados, se expondrán las principales conclusiones en función de cada uno de los parámetros analizados. En este proyecto se ha tratado de caracterizar con la mayor precisión posible el entorno de propagación en una plantación de cítricos.

En primer lugar, respecto al estudio de las pérdidas de propagación la principal conclusión es que se confirma que conforme aumenta la distancia, aumentan las pérdidas, también influye la frecuencia de trabajo y el tipo de antenas. Además, teniendo en cuenta los dos modelos de ajuste tanto el FI como el CI, a frecuencias bajas las pendientes son similares y cuya diferencia de potencia gira en torno a los 5 dB. Si nos situamos a altas frecuencias, como por ejemplo en la banda de 28 GHz, se puede encontrar que para las antenas Omnidireccionales las pendientes no guardan relación ya que a estas frecuencias se produce el efecto multicamino, mientras que para las antenas direccionales se aprecia claramente como este efecto no tiene tanta influencia y las pendientes de ambos modelos con el de las pérdidas son prácticamente idénticas. Se puede confirmar al ver los valores de los parámetros “ n ” que representa la pendiente, y “ σ ” la desviación típica de la tabla 5, en donde los valores de “ n ” para las direccionales son 1.9 muy cercanas a 2 que se corresponden con las pérdidas estimadas en espacio libre, mientras que la de las antenas omnidireccionales es de 1.4 aproximadamente, y en el mismo caso ocurre al comparas las desviaciones típicas en donde la de las antenas direccionales es de 0.5 mientras que la de las omnidireccionales es casi el triple, alcanzando un valor de 1.46.

Respecto al estudio del RMS Delay Spread, se puede observar que la dispersión del retardo es mayor cuanto mayor es el margen escogido, esto es debido a que se incluyen mayores picos de la PDP, que pueden producirse por reflexiones que no son deseadas. Además, los valores de la dispersión de retardo en la mayoría de los casos, si se excluye algunos picos no deseados, dichos valores se encuentran en el rango 0 a 5 ns, teniendo en cuenta que las mediciones se realizaron en



un entorno de cítricos, el cual es un mundo prácticamente inexplorado, los valores no son altos. Por otro lado, mencionar que en el caso de las antenas omnidireccionales, estos valores se disparan a la frecuencia de 28 GHz, debido a que a partir de la distancia de 15 metros, el valor del retardo se incrementa exponencialmente y aumentan las reflexiones que llegan al receptor, por lo que nos quedaríamos con los valores hasta los 15 metros y con un margen de 10 dB.



6.2. Futuras Líneas

A continuación, se van a describir las posibles futuras líneas de investigación, que el presente trabajo plantea:

- Realizar una campaña de medidas en caminos de no visión directa en plantaciones de cítricos y analizar estas medidas aprovechando los programas desarrollados en este trabajo
- Plantear modelos de propagación que estimen las pérdidas y la dispersión temporal basándose en teorías electromagnéticas y comparar los resultados teóricos con las medidas realizadas en este trabajo.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] Digital Farming: What does it really mean? CEMA, Disponible en: <http://www.cema-agri.org/page/digital-farming-what-does-it-really-mean>. Acceso 21/6/2018.
- [2] H. Mahmood Jawad, R. Nordin, S. Kamel Gharghan, A. Mahmood Jawad, and M. Ismail, Energy-Efficient Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture: A Review, *Sensors*, vol. 17, 1-45, Aug. 2015.
- [3] M Hernando Rábanos, ‘Transmisión por radio’, Ed. Centro de estudios Ramón Areces, Tercera edición, 1998.
- [4] F. P. Correia, F. B. S. Carvalho, B. G. Leal, and W.T.A. Lopes, Propagation Analysis in Prediction Agriculture Environment using XBee Devisces, *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC)*, 2013.
- [5] T. S. Rappaport, G. R. MacCartney, M. K. Samimi, and S. Sun, Wideband Millimeter-Wave Propagation Measurements and Channel Models for Future Wireless Communication System Design, *IEEE Trans. On Communications*, vol. 63, no. 9, pp. 3029-3055, sep. 2015.
- [6] Lorenzo Rubio, Senior Member, IEEE, Vicent M. Rodrigo, Peñarrocha , José-María Molina-García-Pardo, Leandro Juan-Llácer , Senior Member, IEEE, Juan Pascual-García , Juan Reig , Senior Member, IEEE, and Concepción Sanchis-Borras. Millimeter Wave Channel Measurements in an Intra-Wagon Environment. *IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY*, VOL. 68, NO. 12, DECEMBER 2019
- [7] Duška ýoja, Member, IEEE, Nataša Neškoviü, Member, IEEE, Aleksandar Neškoviü, Senior Member, IEEE. Channel Impulse Response Estimation using Vector Network Analyzer, 25th Telecommunications forum TELFOR 2017, Serbia, Belgrade, November 21-22, 2017.
- [8] Jelena Senic, Camillo Gentile, Member, IEEE, Peter B. Papazian, Senior Member, IEEE, Kate A. Remley, Fellow, IEEE, and Jae-Kark Choi Analysis of E-Band Path Loss and Propagation Mechanisms in the Indoor Environment *IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION*, VOL. 65, NO. 12, DECEMBER 2017
- [9] Leandro Juan Llacer, ‘El Canal Móvil’. Universidad Politécnica de Cartagena, 2020
- [10] Jose-Maria Molina-Garcia-Pardo, Student Member, IEEE, José-Victor Rodríguez, Member, IEEE, and Leandro Juan-Llácer, Senior Member, IEEE Wide-Band Measurements



and Characterization at 2.1 GHz While Entering in a Small Tunnel IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, VOL. 53, NO. 6, NOVEMBER 2004

[11] Standard Gain Horn Antenna 26.5 to 40 GHz Catalogue number: QSH-SL-26-40-K-20 Q-par reference: QMS-00238.

[12] 0.8-40 GHz Vertically Polarised Omnidirectional Antenna fitted with a K type Connector and Lensed Radome Catalogue number: QOM-SL-0.8-40-K-SG-L Q-par reference QMS-00017.

[13] Sergio Hernández Sáenz, Domingo Pimienta del Valle, Luis Mendo Tomás, Pedro García del Pino, José Manuel Riera Salís. Medición de las pérdidas de propagación en interiores en las bandas milimétricas para 5G de 26 y 39 GHz.