

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR



PROYECTO FIN DE CARRERA

**PÉRDIDAS DE INSERCIÓN EN DIFERENTES TIPOS DE
MATERIALES Y ÁRBOLES**

Ingeniería de Telecomunicación

Ignacio Álvarez Calvo

Abril del 2013

PÉRDIDAS DE INSERCIÓN EN DIFERENTES TIPOS DE MATERIALES Y ÁRBOLES

Autor: Ignacio Álvarez Calvo

Tutor: Bazil Taha Ahmed

Grupo de RFCAS
Grupo de Radio-Frecuencia:
Circuitos, Antenas y Sistemas



Departamento de Tecnología Electrónica
y de las Comunicaciones

Escuela Politécnica Superior
Universidad Autónoma de Madrid

Abril del 2013

▪ Resumen

El gran avance que se está produciendo en los sistemas WiFi y WiMAX, y su habitual utilización en el mundo de las telecomunicaciones, supone una oportunidad de estudio de la propagación en las frecuencias de trabajo que operan estos sistemas. Debido a la escasa información que existe con respecto a estas pérdidas de inserción en la propagación para estas bandas, establecer un radioenlace supone una necesidad de análisis y estudio del mismo.

El objetivo de este Proyecto Fin de Carrera es realizar una campaña de medidas para el cálculo de pérdidas de inserción en diferentes obstáculos situados en diferentes escenarios, tanto interiores como exteriores, para las bandas de trabajo de 2.4 GHz, 3.3 GHz y 5.5 GHz.

Este estudio se realizará a partir de enlaces de corta distancia, donde el obstáculo se interponga directamente entre las dos antenas, de tal manera que se realice una caracterización de las pérdidas de inserción de cada objeto a analizar.

En la campaña de medidas se analizarán diferentes tipos de obstáculos, donde estos se escogerán de tal manera que cumplan una serie de condiciones, ya sea por su impacto en el estudio, por ser comunes en el ámbito cotidiano de las redes inalámbricas, o porque sean los datos obtenidos complementarios a otros estudios similares ya realizados.

Los obstáculos estudiados son muros, cristales, puertas, personas, columnas, es decir obstáculos que se puedan encontrar en interiores. Otros, como la vegetación o árboles que se encuentran en exteriores, también serán analizados para completar el estudio de este proyecto.

Palabras Clave

- Pérdida de inserción
- Obstáculo
- Difracción
- Reflexión
- Dispersión
- Antena
- Polarización
- Banda de trabajo
- WiFi
- WiMAX

▪ Abstract

The advance occurring in WiFi and WiMAX systems, and their habitual use in the world of telecommunications, is an opportunity to study the channel propagation loss working at these frequencies of the mention systems. Because of the limited information that exists regarding the insertion losses produced in these a need for more propagation loss study is necessary to carry out.

The objective of this Thesis is to carry out a measurements campaign to study the insertion loss due to different obstacles or materials in different scenarios, for both indoors and outdoors, within the operating bands of 2.4 GHz, 3.3 GHz and 5.5 GHz

This study will be conducted for short distance links, where the obstacle is interposed directly between the two antennas, so that the characterization of the insertion losses of each object to will be analyzed.

Different types of obstacles, has been chosen to make about study. The reason for choosing them are either because of their impact on the study, being common in everyday wireless networks, or they will be use to get a complementary data that hasn't been mentioned in other similar studies.

The studied obstacles are walls, windows, doors, people, columns, found in indoor scenarios. Other materials such as vegetation or trees found in outdoors scenarios, has been studied to complete this project.

Key words

- Insertion loss
- Obstacle
- Diffraction
- Reflection
- Scattering
- Antenna
- Polarization
- Operating Band
- WiFi
- WiMAX

▪ **Agradecimientos**

En primer lugar querría agradecer todo el apoyo recibido por mi tutor Bazil Ahmed Taha, a lo largo de estos meses, gracias a él, he podido realizar este trabajo de una forma amena y muy dinámica desde el principio hasta el final de mi estancia en el departamento. Por supuesto incidir en la constante disponibilidad para la resolución de dudas y la ayuda en los diversos escenarios caracterizados en este Proyecto Fin de Carrera.

En el departamento, además de mi tutor, me han apoyado profesores como Jose Luis Masa, Juan Corcoles o Jorge Ruiz, así como también mis compañeros Juan Pablo, “Los Guillemos”, Pablo Sánchez o Sandra. Muchas gracias por todo.

También me gustaría dedicar todo este trabajo a mi familia, mis padres, mi hermana y mi abuela. Son lo que más quiero en el mundo y sin ellos, todo lo que he soñado, y poco a poco he ido realizando en mi trayectoria académica y social, no hubiera sido posible.

Agradecer todo el apoyo y ánimo recibido por mi novia, juntos hemos salido adelante de muchos baches y decisiones importantes que nos han surgido en la vida, pero siempre hemos sabido resolverlos y espero que todo lo que me está aportando continúe por mucho tiempo. Muchas gracias Nora.

Quiero acordarme de mis amistades durante mi estancia en la universidad que han sido muchas, en especial de Diego, gran amigo desde la guardería hasta hoy. Muchas gracias Corri, pienso que me has aportado más de lo que creía y todavía creo. Eres una gran persona y para mí lo has sido todo tanto en lo social, lo académico, como en lo personal.

Tomas y Dani, que decir... Han sido mis mejores colegas y compañeros en esta época universitaria y lo han demostrado desde el principio hasta el final, sin ellos, llegar hasta aquí, no hubiera sido posible. Tomás, he disfrutado de tu compañía hasta el final, desde el primer “mus” hasta el último café mañanero.

Quiero acordarme de mis otros amigos de mi infancia, en especial: Borja, Basi, Enrique, Pablo y sobretodo de ti “Roberto Gallego”. Este trabajo va por ti, siempre estarás en mí, descansa en paz, te recordaré siempre amigo.

▪ Índice general

	Pag
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Introducción general.....	2
1.2 Motivación del proyecto.....	4
1.3 Objetivos y enfoque.....	4
1.4 Plan de trabajo y medios disponibles.....	5
CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE.....	6
2.1 Redes inalámbricas.....	7
2.2 WiFi.....	8
2.2.1 Aplicaciones y características.....	8
2.3 WiMaX.....	10
2.3.1 Aplicaciones y características.....	10
2.4 Trabajos relacionados.....	12
CAPÍTULO 3: FÍSICA RADIO.....	13
3.1 Campos y ondas electromagnéticas.....	14
3.2 Espectro electromagnético.....	16
3.3 Mecanismos de propagación.....	17
3.3.1 El principio de Huygens.....	17
3.3.2 Propagación y pérdidas en el espacio libre.....	17
3.3.2.1 Línea Visual y Zonas de Fresnel.....	18
3.3.3 Propagación y pérdidas a través de otros medios.....	19
3.3.3.1 Difracción.....	19
3.3.3.2 Reflexión.....	20
3.3.3.3 Refracción.....	21
3.3.3.4 Absorción.....	22
3.3.3.5 Multitrayecto.....	23
CAPÍTULO 4: TEORÍA DE ANTENAS.....	24
4.1 Antenas. Definición y características.....	25
4.2 Tipos de antenas en las comunicaciones inalámbricas.....	26
4.3 Polarización.....	27
4.4 Diagrama de radiación.....	28
4.5 Lóbulos y ancho de haz.....	29
4.6 Densidad de potencia radiada.....	30
4.7 Directividad.....	30

	Pag
4.8 Eficiencia.....	31
4.9 Ganancia.....	31
4.10 Regiones del campo.....	32
4.11 Ancho de banda de trabajo.....	33
CAPÍTULO 5: MATERIAL Y CONCEPTOS RELACIONADOS.....	34
5.1 Analizador de redes.....	35
5.1.1 Parámetros S.....	35
5.1.2 Parámetros S ₂₁ y S ₁₁	37
5.2 Kit de calibración.....	37
5.3 Antenas	37
5.3.1 Antena de Panel de 2.4 GHz	38
5.3.2 Antena de Panel de 3.3 GHz.....	38
5.3.3 Antena de Panel de 5.5 GHz.....	38
5.4 Soportes y trípodes.....	39
5.5 Cables.....	39
5.6 Medidor láser	39
5.7 Nivel.....	40
5.8 Otras herramientas.....	40
CAPÍTULO 6: METODOLOGÍA Y TIPOS DE ESCENARIOS.....	41
6.1 Banda útil e identificación de antenas.....	42
6.1.1 Resultados	44
6.1.2 Conclusiones.....	47
6.1.3 Bandas, canales y número de puntos.....	48
6.2 Procedimiento en la medida en escenarios.....	48
6.2.1 Posición de las antenas receptora y transmisora con respecto al obstáculo	48
6.2.2 Calibración en un escenario.....	49
6.2.3 Medida y captura de datos.....	50
6.3 Tipos de escenarios, cobertura y obstáculos a analizar.....	51
CAPÍTULO 7: CAMPAÑA DE MEDIDAS.....	52
7.1 Escenario 1: Cristal doble con cámara de aire.....	53
7.1.1 Estructura, dimensiones y puntos de análisis.....	53
7.1.2 Teoría aplicada: Modelización de la estructura.....	54
7.1.3 Resultados y análisis del escenario.....	55
7.1.4 Conclusiones.....	69
7.2 Escenario 2: Pared de ladrillo y hormigón.....	70

	Pag
7.2.1 Estructura, dimensiones y puntos de análisis.....	70
7.2.2 Teoría aplicada: Modelización de la estructura.....	71
7.2.3 Resultados y análisis del escenario.....	71
7.2.4 Conclusiones.....	78
7.3 Escenario 3: Puerta de metal con ventana de ojo de buey.....	79
7.3.1 Estructura, dimensiones y puntos de análisis.....	79
7.3.2 Teoría aplicada: Modelización de la estructura.....	80
7.3.3 Resultados y análisis del escenario.....	81
7.3.4 Conclusiones.....	89
7.4 Escenario 4: Columna de ladrillo y hormigón.....	90
7.4.1 Estructura, dimensiones y puntos de análisis.....	90
7.4.2 Teoría aplicada: Modelización de la estructura.....	91
7.4.3 Resultados y análisis del escenario.....	92
7.4.4 Conclusiones.....	99
7.5 Escenario 5: Rejilla de metal.....	100
7.5.1 Estructura, dimensiones y puntos de análisis.....	100
7.5.2 Teoría aplicada: Modelización de la estructura.....	101
7.5.3 Resultados y análisis del escenario.....	104
7.5.4 Conclusiones.....	111
7.6 Escenario 6: Pasillo con tres puertas de madera.....	113
7.6.1 Estructura, dimensiones y puntos de análisis.....	113
7.6.2 Teoría aplicada: Modelización de la estructura.....	114
7.6.3 Resultados y análisis del escenario.....	114
7.6.4 Conclusiones.....	121
7.7 Escenario 7: Personas.....	122
7.7.1 Estructura, dimensiones y puntos de análisis.....	122
7.7.2 Teoría aplicada: Modelización de la estructura.....	125
7.6.3 Resultados y análisis del escenario.....	126
7.7.4 Conclusiones.....	141
7.8 Escenario 8: Columna con enredadera.....	144
7.8.1 Estructura, dimensiones y puntos de análisis.....	144
7.8.2 Teoría aplicada: Modelización de la estructura.....	145
7.8.3 Resultados y análisis del escenario.....	146
7.8.4 Conclusiones.....	152
7.9 Escenario 9: Árbol	153

	Pag
7.9.1 Primer Caso: “Con Hojas”.Estructura, dimensiones y puntos de análisis.....	153
7.9.2 Teoría aplicada: Modelización de la estructura.....	154
7.9.3 Resultados y análisis del escenario.....	156
7.9.4 Segundo Caso: “Sin Hojas”.Estructura, dimensiones y puntos de análisis.....	161
7.9.5 Teoría aplicada: Modelización de la estructura.....	162
7.9.6 Resultados y análisis del escenario.....	162
7.9.7 Comparativa entre los dos casos: “Con hojas” y “Sin hojas”.....	165
7.9.8 Conclusiones.....	170
7.10 Escenario 10: Palmera.....	172
7.10.1 Estructura, dimensiones y puntos de análisis.....	172
7.10.2 Teoría aplicada: Modelización de la estructura.....	173
7.10.3 Resultados y análisis del escenario.....	175
7.10.4 Conclusiones.....	181
7.11 Escenario 11: Abeto.....	183
7.11.1 Estructura, dimensiones y puntos de análisis.....	183
7.11.2 Teoría aplicada: Modelización de la estructura.....	184
7.11.3 Resultados y análisis del escenario.....	185
7.11.4 Conclusiones.....	191
CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	192
Conclusiones generales del proyecto.....	193
Trabajo Futuro.....	197
REFERENCIAS.....	198
APENDICE A: Anexos.....	200
APENDICE B: Artículo publicado.....	207
APENDICE C: Presupuesto.....	219
APENDICE D: Pliego de condiciones.....	221

▪ Índice de figuras

	Pag
CAPITULO 1	
Figura 1.1: Presentación de Steve Jobs en la WWDC 2010.....	2
Figura 1.2: Tecnologías inalámbricas.....	3
CAPITULO 2	
Figura 2.1: Esquema de las redes inalámbricas según la cobertura.....	8
Figura 2.2: Logotipo de WiFi.....	8
Figura 2.3: Ejemplos de despliegue Red WiFi.....	9
Figura 2.4: Logotipo de WiMAX.....	10
Figura 2.5: Ejemplos de despliegue Red WiMAX.....	11
CAPITULO 3	
Figura 3.1 y 3.2: Caracterización de una onda electromagnética.....	14
Figura 3.3: Tipos de polarización en la propagación de una onda electromagnética.....	15
Figura 3.4: Espectro Electromagnético	16
Figura 3.5: Representación de la Zona de Fresnel.....	18
Figura 3.6: Efecto de la Difracción.....	19
Figura 3.7: Efecto de la Reflexión.....	20
Figura 3.8: Tipos de Reflectores.....	20
Figura 3.9: Efecto de la Refracción.....	21
Figura 3.10: Efecto del Multitrayecto.....	23
CAPITULO 4	
Figura 4.1: Tipos de Antenas Direccionales.....	26
Figura 4.2: Antenas Omnidireccionales.....	26
Figura 4.3: Antenas Sectoriales.....	27
Figura 4.4: Polarización Horizontal.....	28
Figura 4.5: Polarización Vertical.....	28
Figura 4.6: Diagrama de radiación.....	29
Figura 4.7: Tipos de lóbulos y Ancho de haz.....	29
Figura 4.8: Regiones del campo.....	32
CAPITULO 5	
Figura 5.1: Analizador Rohde & Schwarz ZVL (9 Khz-6Ghz).....	35
Figura 5.2: Representación de los parámetros S de un circuito.....	36
Figura 5.3: kit de calibración Agilent 85033E 3.5 mm.....	37
Figura 5.4: Antenas de de 2.4 GHz , 3.3 GHz y 5.4 GHz.....	38

	Pag
Figura 5.5: Tipos de trípodes y soportes.....	39
Figura 5.6: Latiguillos con conector SMA.....	39
Figura 5.7: Medidor laser Bosch DLE40.....	40
Figura 5.8: M-D SmartTool Builder's Angle Sensor Module.....	40
CAPITULO 6	
Figura 6.1: Procedimiento de elección de banda útil.....	42
Figura 6.2: Procedimiento de calibración con el kit.....	43
Figura 6.3: Parámetro S11 "Normalizado a 0" con el Kit de Calibración.....	44
Figura 6.4: Parámetro S11 de la Antena 1 de 2.4 GHz.....	44
Figura 6.5: Parámetro S11 de la Antena 2 de 2.4 GHz.....	45
Figura 6.6: Parámetro S11 de la Antena 1 de 3.3 GHz.....	45
Figura 6.7: Parámetro S11 de la Antena 2 de 3.3 GHz.....	46
Figura 6.8: Parámetro S11 de la Antena 1 de 5.5 GHz.....	46
Figura 6.9: Parámetro S11 de la Antena 1 de 5.5 GHz.....	47
Figura 6.10: Captura de datos en el analizador.....	48
CAPITULO 7	
ESCENARIO 1	
Figura 7.1.1 y 7.1.2: Diferentes vistas del cristal doble con cámara de aire.....	53
Figura 7.1.3: Dimensiones y puntos de análisis del escenario.....	53
Figura 7.1.4: Estructura del escenario.....	54
Figura 7.1.5: Refracción del cristal.....	54
Figura 7.1.6: Reflexión del cristal.....	55
Figura 7.1.7: Medida en el "Punto A" a 2.4 GHz.....	56
Figura 7.1.8: Medida en el "Punto B" a 2.4 GHz.....	56
Figura 7.1.9: Medida en el "Punto C" a 2.4 GHz.....	57
Figura 7.1.10: Medida en el "Punto D" a 2.4 GHz.....	57
Figura 7.1.11: Medida en el "Punto E" a 2.4 GHz.....	58
Figura 7.1.12: Medida en el "Punto A" a 3.3 GHz.....	58
Figura 7.1.13: Medida en el "Punto B" a 3.3 GHz.....	59
Figura 7.1.14: Medida en el "Punto C" a 3.3 GHz.....	59
Figura 7.1.15: Medida en el "Punto D" a 3.3 GHz.....	60
Figura 7.1.16: Medida en el "Punto E" a 3.3 GHz.....	60
Figura 7.1.17: Medida en el "Punto A" a 5.5 GHz.....	61
Figura 7.1.18: Medida en el "Punto B" a 5.5 GHz.....	61
Figura 7.1.19: Medida en el "Punto C" a 5.5 GHz.....	62

	Pag
Figura 7.1.20: Medida en el "Punto D" a 5.5 GHz.....	62
Figura 7.1.21: Medida en el "Punto E" a 5.5 GHz.....	63
Figura 7.1.22: Medida en el "Punto A" para las tres bandas.....	64
Figura 7.1.23: Medida en el "Punto B" para las tres bandas.....	64
Figura 7.1.24: Medida en el "Punto C" para las tres bandas.....	65
Figura 7.1.25: Medida en el "Punto D" para las tres bandas.....	65
Figura 7.1.26: Medida en el "Punto E" para las tres bandas.....	66
Figura 7.1.28: Media y desviación estándar en Polarización Horizontal.....	67
Figura 7.1.28: Media y desviación estándar en Polarización Vertical.....	67
Figura 7.1.29: Pérdida de inserción en cada punto de interés.....	68
Figura 7.1.30: Pérdida de inserción en cada punto de interés.....	68
ESCENARIO 2	
Figura 7.2.1 y 7.2.2: Diferentes vistas del muro de ladrillo y hormigón.....	70
Figura 7.2.3: Dimensiones y puntos de análisis del escenario.....	70
Figura 7.2.4: Medidas para 2.4 GHz en Polarización Horizontal.....	72
Figura 7.2.5: Medidas para 3.3 GHz en Polarización Horizontal.....	72
Figura 7.2.6: Medidas para 5.5 GHz en Polarización Horizontal.....	73
Figura 7.2.7: Medidas para 2.4 GHz en Polarización Vertical.....	73
Figura 7.2.8: Medidas para 3.3 GHz en Polarización Vertical.....	74
Figura 7.2.9: Medidas para 3.3 GHz en Polarización Vertical.....	74
Figura 7.2.10: Medida para el "Punto A" para las tres bandas.....	75
Figura 7.2.11: Medida para el "Punto B" para las tres bandas.....	75
Figura 7.2.12: Medida para el "Punto C" para las tres bandas.....	76
Figura 7.2.13: Medida para el "Punto D" para las tres bandas.....	76
Figura 7.2.14: Medida para el "Punto E" para las tres bandas.....	77
Figura 7.1.15: Media y desviación estándar en Polarización Horizontal.....	77
Figura 7.1.16: Media y desviación estándar en Polarización Vertical.....	78
ESCENARIO 3	
Figura 7.3.1 y 7.3.2: Diferentes vistas de la puerta metálica con ojo de buey	79
Figura 7.3.3: Dimensiones y puntos de análisis del escenario.....	79
Figura 7.3.4: Efectos y fenómenos en la caracterización del escenario.....	80
Figura 7.3.5: Medidas en la banda de 2.4 GHz con Polarización Horizontal.....	81
Figura 7.3.6: Medidas en la banda de 3.3 GHz con Polarización Horizontal.....	82
Figura 7.3.7: Medidas en la banda de 5.5 GHz con Polarización Horizontal.....	82
Figura 7.3.8: Medidas en la banda de 2.4 GHz con Polarización Vertical.....	83

	Pag
Figura 7.3.9: Medidas en la banda de 3.3 GHz con Polarización Vertical.....	83
Figura 7.3.10: Medidas en la banda de 5.5 GHz con Polarización Vertical.....	84
Figura 7.3.11: Nivel de pérdida en la banda de 2.4 GHz con Polarización Horizontal.....	85
Figura 7.3.12: Nivel de pérdida en la banda de 3.3 GHz con Polarización Horizontal.....	85
Figura 7.3.13: Nivel de pérdida en la banda de 5.5 GHz con Polarización Horizontal.....	86
Figura 7.3.14: Nivel de pérdida en la banda de 2.4 GHz con Polarización Vertical.....	86
Figura 7.3.15: Nivel de pérdida en la banda de 3.3 GHz con Polarización Vertical.....	87
Figura 7.3.16: Nivel de pérdida en la banda de 5.5 GHz con Polarización Vertical.....	87
Figura 7.3.17: Nivel de pérdida en las tres bandas con Polarización Horizontal.....	88
Figura 7.3.18: Nivel de pérdida en las tres bandas con Polarización Vertical.....	88
ESCENARIO 4	
Figura 7.4.1 y 7.4.2: Diferentes vistas de la columna de ladrillo y hormigón.....	90
Figura 7.4.3: Dimensiones y puntos de análisis del escenario.....	90
Figura 7.4.4: Difracción en las esquinas de la columna.....	91
Figura 7.4.5: Consecuencia del cambio de distancia en recepción con respecto al obstáculo.....	92
Figura 7.4.6: Medidas en la banda de 2.4 GHz con Polarización Horizontal.....	93
Figura 7.4.7: Medidas en la banda de 3.3 GHz con Polarización Horizontal.....	93
Figura 7.4.8: Medidas en la banda de 5.5 GHz con Polarización Horizontal.....	94
Figura 7.4.9: Medidas en la banda de 2.4 GHz con Polarización Vertical.....	94
Figura 7.4.10: Medidas en la banda de 3.3 GHz con Polarización Vertical.....	95
Figura 7.4.11: Medidas en la banda de 5.5 GHz con Polarización Vertical.....	95
Figura 7.4.12: Medidas en las tres bandas con Polarización Horizontal.....	96
Figura 7.4.13: Medidas en las tres bandas con Polarización Vertical.....	97
Figura 7.4.14: Medidas en cada punto en las tres bandas con Polarización Horizontal.....	98
Figura 7.4.15: Medidas en cada punto en las tres bandas con Polarización Vertical.....	98
ESCENARIO 5	
Figura 7.5.1 y 7.5.2: Diferentes vistas de la rejilla de metal.....	100
Figura 7.5.3 y 7.5.4: Dimensiones y puntos de análisis del escenario.....	100
Figura 7.5.5: Línea de transmisión modelada para FSS inductivos.....	101
Figura 7.5.6: Circuitos equivalentes con respecto a las estructuras.....	101
Figura 7.5.7: Transmitancia de los filtros equivalentes para cada estructura.....	103
Figura 7.5.8: Ejemplo de transmitancia para parches metálicos y aperturas en plano metálico ...	104
Figura 7.5.9: Media y desviación en Polarización Horizontal a 1 metro de transmisión.....	105
Figura 7.5.10: Media y desviación en Polarización Horizontal a 1.20 metros de transmisión.....	105
Figura 7.5.11: Media y desviación en Polarización Horizontal a 0.80 metros de transmisión.....	106

	Pag
Figura 7.5.12: Media y desviación en Polarización Vertical a 1 metro de transmisión.....	106
Figura 7.5.13: Media y desviación en Polarización Vertical a 1.20 metros de transmisión.....	107
Figura 7.5.14: Media y desviación en Polarización Vertical a 0.80 metros de transmisión.....	107
Figura 7.5.15: Medida en 2.4 GHz en el "Punto A" a 1 metro de transmisión.....	108
Figura 7.5.16: Medida en 2.4 GHz en el "Punto A" a 0.80 metros de transmisión.....	108
Figura 7.5.17: Medida en 2.4 GHz en el "Punto A" a 1.20 metros de transmisión.....	109
Figura 7.5.18: Medida en 2.4 GHz en el "Punto A" a 0.80 metros de transmisión.....	109
Figura 7.5.19: Medida en 2.4 GHz en el "Punto B" a 0.80 metros de transmisión.....	110
Figura 7.5.20: Medida en 2.4 GHz en el "Punto C" a 0.80 metros de transmisión.....	110
Figura 7.5.21: Medida en las tres bandas en el "Punto A" a 1.20 metros de transmisión.....	111
ESCENARIO 6	
Figura 7.6.1 y 7.6.2: Diferentes vistas del pasillo con 3 puertas de madera.....	113
Figura 7.6.3: Dimensiones y puntos de análisis del escenario.....	113
Figura 7.6.4: Todos los casos en el "Punto 1" en la banda de 2.4 GHz.....	115
Figura 7.6.5: Todos los casos en el "Punto 2" en la banda de 2.4 GHz.....	115
Figura 7.6.6: Todos los casos en el "Punto 3" en la banda de 2.4 GHz.....	116
Figura 7.6.7: Todos los casos en el "Punto 1" en la banda de 3.3 GHz.....	116
Figura 7.6.8: Todos los casos en el "Punto 2" en la banda de 3.3 GHz.....	117
Figura 7.6.9: Todos los casos en el "Punto 3" en la banda de 3.3 GHz.....	117
Figura 7.6.10: Todos los casos en el "Punto 1" en la banda de 5.5 GHz.....	118
Figura 7.6.11: Todos los casos en el "Punto 2" en la banda de 5.5 GHz.....	118
Figura 7.6.12: Todos los casos en el "Punto 3" en la banda de 5.5 GHz.....	119
Figura 7.6.13: Todos los casos, en la banda de 2.4 GHz, para todos los puntos.....	120
Figura 7.6.14: Todos los casos, en la banda de 3.3 GHz, para todos los puntos.....	120
Figura 7.6.15: Todos los casos, en la banda de 5.5 GHz, para todos los puntos.....	121
ESCENARIO 7	
Figura 7.7.1 y 7.7.2: Vista frontal y perfil del Sujeto1.....	122
Figura 7.7.3 y 7.7.4: Vista frontal y perfil del Sujeto2.....	122
Figura 7.7.5 y 7.7.6: Vista frontal y perfil del Sujeto3.....	123
Figura 7.7.7 y 7.7.8: Vista frontal y perfil del Sujeto4.....	123
Figura 7.7.9 y 7.7.10: Vista frontal y perfil del Sujeto5.....	124
Figura 7.7.11: Posturas y zonas de medición características del escenario.....	125
Figura 7.7.12: Caso A: Un solo sujeto como obstáculo.....	126
Figura 7.7.13: Caso A: Sujeto 1 en la banda 2.4 GHz.....	126
Figura 7.7.14: Caso A: Sujeto 2 en la banda 2.4 GHz.....	127

	Pag
Figura 7.7.15: Caso A: Sujeto 3 en la banda 2.4 GHz.....	127
Figura 7.7.16: Caso A: Sujeto 4 en la banda 2.4 GHz.....	128
Figura 7.7.17: Caso A: Sujeto 5 en la banda 2.4 GHz.....	128
Figura 7.7.18: Caso A: Sujeto 1 en la banda 3.3 GHz.....	129
Figura 7.7.19: Caso A: Sujeto 2 en la banda 3.3 GHz.....	129
Figura 7.7.20: Caso A: Sujeto 3 en la banda 3.3 GHz.....	130
Figura 7.7.21: Caso A: Sujeto 4 en la banda 3.3 GHz.....	130
Figura 7.7.22: Caso A: Sujeto 5 en la banda 3.3 GHz.....	131
Figura 7.7.23: Caso A: Sujeto 1 en la banda 5.5 GHz.....	131
Figura 7.7.24: Caso A: Sujeto 2 en la banda 5.5 GHz.....	132
Figura 7.7.25: Caso A: Sujeto 3 en la banda 5.5 GHz.....	132
Figura 7.7.26: Caso A: Sujeto 4 en la banda 5.5 GHz.....	133
Figura 7.7.27: Caso A: Sujeto 5 en la banda 5.5 GHz.....	133
Figura 7.7.28: Caso A: Media y desviación en las tres bandas “ Posición 0° ”	134
Figura 7.7.29: Caso A: Media y desviación en las tres bandas “ Posición 90° ”	134
Figura 7.7.30: Caso A: Media y desviación en las tres bandas “ Posición 45° ”	135
Figura 7.7.31: Caso A: Media y desviación en las tres bandas “ Lateral ”	135
Figura 7.7.32: Caso A: Media y desviación en las tres bandas “ Cara”	136
Figura 7.7.33: Caso A: Media y desviación en las tres bandas “ Lateral de la cabeza”	136
Figura 7.7.34: Caso B: Dos sujetos, uno detrás del otro, como obstáculo.....	137
Figura 7.7.35: Caso B: Media y desviación en las tres bandas “ Posición 0° ”	137
Figura 7.7.36: Caso B: Media y desviación en las tres bandas “ Posición 90° ”	138
Figura 7.7.37: Caso B: Media y desviación en las tres bandas “ Posición 45° ”	138
Figura 7.7.38: Caso B: Media y desviación en las tres bandas “ Lateral ”	139
Figura 7.7.39: Caso B: Media y desviación en las tres bandas “ Cara ”	139
Figura 7.7.40: Caso B: Media y desviación en las tres bandas “Lateral de la cabeza”	140
Figura 7.7.41: Caso B: Tres sujetos, uno al lado del otro, como obstáculo.....	140
Figura 7.7.42: Caso C: Media y desviación en las tres bandas “ Posición 0° ”	141
ESCENARIO 8	
Figura 7.8.1 y 7.8.2: Diferentes vistas de la columna con enredadera.....	144
Figura 7.8.3 y 7.8.4: Dimensiones y puntos de análisis del escenario.....	144
Figura 7.8.5: Media y desviación en las tres bandas, en la “Posición 1”, Polarización Horizontal...146	146
Figura 7.8.6: Media y desviación en las tres bandas, en la “Posición 2”, Polarización Horizontal...147	147
Figura 7.8.7: Media y desviación en las tres bandas, en la “Posición 1”, Polarización Vertical.....147	147
Figura 7.8.8: Media y desviación en las tres bandas, en la “Posición 2”, Polarización Vertical.....148	148

	Pag
Figura 7.8.9: Medidas en cada punto para la banda de 2.4 GHz.....	149
Figura 7.8.10: Medidas en cada punto para la banda de 3.3 GHz.....	149
Figura 7.8.11: Medidas en cada punto para la banda de 5.5 GHz.....	150
Figura 7.8.12: Medidas en las tres bandas para la “Posición 1”	151
Figura 7.8.13: Medidas en las tres bandas para la “Posición 2”	151
ESCENARIO 9	
Figura 7.9.1 y 7.9.2: Diferentes vistas del árbol con hojas.....	153
Figura 7.9.3 y 7.9.4: Dimensiones y puntos de análisis del escenario.....	153
Figura 7.9.5: 1º Modelo de difracción en arista en filo de cuchillo aislada doble.....	154
Figura 7.9.6: 2º Modelo de difracción en arista en filo de cuchillo aislada doble.....	155
Figura 7.9.7: Modelo de Reflexionen el suelo.....	155
Figura 7.9.8: Modelo de transmisión para diferentes ángulos de recepción.....	157
Figura 7.9.9: Medidas para cada ángulo de recepción en la banda 2.4 GHz.....	158
Figura 7.9.10: Medidas para cada ángulo de recepción en la banda 3.3 GHz.....	158
Figura 7.9.11: Medidas para cada ángulo de recepción en la banda 5.5 GHz.....	159
Figura 7.9.12: Medidas en las tres bandas para todos los puntos en Polarización Horizontal.....	160
Figura 7.9.13: Medidas en las tres bandas para todos los puntos en Polarización Vertical.....	160
Figura 7.9.14 y 7.9.15: Diferentes vistas del árbol sin hojas.....	161
Figura 7.9.16: Dimensiones y puntos de análisis del escenario.....	161
Figura 7.9.17: Medidas para cada ángulo de recepción en la banda 2.4 GHz.....	163
Figura 7.9.18: Medidas para cada ángulo de recepción en la banda 3.3 GHz.....	163
Figura 7.9.19: Medidas para cada ángulo de recepción en la banda 5.5 GHz.....	164
Figura 7.9.20: Medidas en las tres bandas para todos los puntos en Polarización Horizontal.....	164
Figura 7.9.21: Medidas en las tres bandas para todos los puntos en Polarización Vertical.....	165
Figura 7.9.22: Comparativa de los puntos C y D para 2.4 GHz, en Polarización Horizontal	166
Figura 7.9.23: Comparativa de los puntos C y D para 3.3 GHz, en Polarización Horizontal.....	166
Figura 7.9.24: Comparativa de los puntos C y D para 5.5 GHz, en Polarización Horizontal.....	167
Figura 7.9.25: Comparativa de los puntos C y D para 2.4 GHz, en Polarización Vertical.....	167
Figura 7.9.26: Comparativa de los puntos C y D para 3.3 GHz, en Polarización Vertical.....	168
Figura 7.9.27: Comparativa de los puntos C y D para 3.3 GHz, en Polarización Vertical.....	168
Figura 7.9.28: Comparativa de todos puntos, para las tres bandas, en Polarización Horizontal....	169
Figura 7.9.29: Comparativa de todos puntos, para las tres bandas, en Polarización Vertical.....	169
ESCENARIO 10	
Figura 7.10.1 y 7.10.2: Diferentes vistas de la palmera.....	172
Figura 7.10.3: Dimensiones y puntos de análisis del escenario.....	172

	Pag
Figura 7.10.4: Modelo de dispersión para la hoja de la palmera.....	173
Figura 7.10.5: Esquema general de los vectores de incidencia y refracción del modelo	174
Figura 7.10.6: Modelo de propagación en una palmera...174	
Figura 7.10.7: Medida en 2.4 GHz en los tres puntos en 0° para la Polarización Horizontal	175
Figura 7.10.8: Medida en 3.3 GHz en los tres puntos en 0° para la Polarización Horizontal.....	176
Figura 7.10.9: Medida en 3.3 GHz en los tres puntos en 0° para la Polarización Horizontal.....	176
Figura 7.10.10: Medida en 2.4 GHz en los tres puntos en 0° para la Polarización Vertical.....	177
Figura 7.10.11: Medida en 3.3 GHz en los tres puntos en 0° para la Polarización Vertical.....	177
Figura 7.10.12: Medida en 3.3 GHz en los tres puntos en 0° para la Polarización Vertical.....	178
Figura 7.10.13: Modelo de transmisión para diferentes ángulos de recepción.....	178
Figura 7.10.14: Medidas para cada ángulo de recepción en la banda 2.4 GHz.....	179
Figura 7.10.15: Medidas para cada ángulo de recepción en la banda 3.3 GHz.....	179
Figura 7.10.16: Medidas para cada ángulo de recepción en la banda 5.5 GHz.....	180
Figura 7.10.17: Medidas en las tres bandas para todos los puntos en Polarización Horizontal.....	180
Figura 7.10.18: Medidas en las tres bandas para todos los puntos en Polarización Vertical.....	181
ESCENARIO 11	
Figura 7.11.1 y 7.11.2: Diferentes vistas del abeto.....	183
Figura 7.11.3: Dimensiones y puntos de análisis del escenario.....	183
Figura 7.11.4: Zonas del abeto a caracterizar en radioenlace.....	184
Figura 7.11.5: Medida en 2.4 GHz en los tres puntos en 0° para la Polarización Horizontal.....	185
Figura 7.11.6: Medida en 3.3 GHz en los tres puntos en 0° para la Polarización Horizontal.....	185
Figura 7.11.7: Medida en 5.5 GHz en los tres puntos en 0° para la Polarización Horizontal.....	186
Figura 7.11.8: Medida en 2.4 GHz en los tres puntos en 0° para la Polarización Vertical.....	186
Figura 7.11.9: Medida en 3.3 GHz en los tres puntos en 0° para la Polarización Vertical.....	187
Figura 7.11.10: Medida en 5.5GHz en los tres puntos en 0° para la Polarización Vertical.....	187
Figura 7.11.11: Modelo de transmisión para diferentes ángulos de recepción.....	188
Figura 7.11.12: Medidas para cada ángulo de recepción en la banda 2.4 GHz.....	188
Figura 7.11.13: Medidas para cada ángulo de recepción en la banda 3.3 GHz.....	189
Figura 7.11.14: Medidas para cada ángulo de recepción en la banda 5.5 GHz.....	189
Figura 7.11.15: Medidas en las tres bandas para todos los puntos en Polarización Horizontal.....	190
Figura 7.11.16: Medidas en las tres bandas para todos los puntos en Polarización Vertical.....	190

■ Índice de tablas

Tabla 1: Tipos de Interferencia por Absorción para diversos tipos de materiales.....	22
Tabla 2: Tabla orientativa de las pérdidas de inserción en diferentes materiales.....	196

▪ Preámbulo

Organización del Proyecto

El proyecto está organizado en 7 capítulos:

Introducción.

Estado del arte.

Física radio.

Teoría de antenas.

Material y conceptos relacionados.

Metodología y tipos de escenarios.

Campaña de medidas.

Así como también las conclusiones del proyecto, trabajos futuros, referencias y una serie de apéndices que completarán el trabajo realizado.

Nota sobre la versión

Esta versión de la memoria contiene las gráficas y los datos de las medidas que hemos creído importante reflejar. Esto se ha decidido debido a que la memoria podría llegar a ser demasiado extensa, y esa no es la finalidad de la misma.

Herramientas utilizadas

El documento se ha realizado con “Microsoft Office 2007”. Los formatos de texto que han sido utilizados son “Californian FB” a tamaño “11pt” para la redacción y “Book Antiqua” en diversos títulos. Todas las imágenes incluidas están en formato “PNG” (Portable Network Graphics). Por último señalar que todas las gráficas realizadas se han extraído y obtenido mediante código a través del programa “Matlab”.

Nota sobre el copyright

Los derechos de cualquier marca comercial o registrada mencionada en el presente documento son propiedad de sus respectivos titulares.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción general

En los últimos años, las telecomunicaciones han experimentado un gran avance, impulsadas entre otros, por la evolución de las comunicaciones vía radio. Tecnologías como GSM¹ ó UMTS² cambiaron radicalmente en su día la forma de ver las telecomunicaciones y con ello, surgieron numerosos servicios que iban más allá de la mera definición de la comunicación radio. Bluetooth, Video llamada o internet fueron tecnologías renovadores en el mundo de la telefonía y un punto de inflexión para la necesidad de una altísima demanda de banda ancha.



Figura 1.1: Presentación de Steve Jobs en la WWDC 2010³

Por otro lado, estos nuevos servicios fueron el inicio de una gran revolución de las tecnologías inalámbricas y aplicaciones móviles, que hoy en día, se ven reflejadas en los dispositivos y terminales, como los smartphones. La necesidad de comunicación inalámbrica, iba por tanto, más allá del simple uso de conexión a internet en los ordenadores domésticos en el ámbito inalámbrico, es decir, con el paso del tiempo podíamos observar como ya existía una clara expansión en lugares que hace años eran impensables como hoteles, carreteras, aeropuertos o incluso aviones.

WiFi⁴ o WiMAX⁵ fueron, y siguen siendo, unas de las más importantes tecnologías que aliviaron esta necesidad de banda ancha, y que en la actualidad están continuamente en desarrollo debido a su gran impacto en la sociedad y el mundo de los smartphones.

¹ GSM (Group Special Mobile o Global System for Mobile Communications)

² UMTS (Universal Mobile Telecommunications System)

³ WWDC 2010: (Worldwide Developers Conference 2010)

⁴ WiFi (Wireless Fidelity)

⁵ WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access)



Figura 1.2: Tecnologías inalámbricas

El mayor beneficio de la tecnología de red inalámbrica WiFi es la flexibilidad del servicio y la movilidad del usuario, de tal manera que se puedan utilizar estos servicios de banda ancha sin cables, con gran sencillez de instalación, accesibilidad móvil y un coste asequible.

Sin embargo con la tecnología actual inalámbrica WiFi, el beneficio es para aquellos que tienen acceso a este recurso, ya sea con un ordenador portátil o con una PDA o Smartphone equipada con WiFi. Cuando se trata de conectar instituciones o personas que no tienen acceso a un medio de conectividad en su entorno por estar en lugares muy apartados o bien porque simplemente los servicios de conectividad a Internet del terminal son escasos, la red inalámbrica WiFi deja de ser una opción.

La tecnología WiMAX surgió precisamente para permitir la conectividad inalámbrica de banda ancha a esos sitios que carecen de medios que permitan a la gente y a las organizaciones conectarse a internet y en consecuencia, a los servicios que con ello se ofrecen. Esta tecnología es más compleja, exige de una infraestructura para las conexiones entre equipos, y esto se debe, en gran medida, a que su uso principal es en exteriores. Aun así permite enlaces con más capacidad y calidad de servicio, y es el complemento ideal en despliegues municipales que quieren disponer de una banda ancha fija.

Por tanto, WiFi y WiMAX, representan dos de las tecnologías con más éxito y proyección de futuro dentro del panorama de las telecomunicaciones. Lo que tradicionalmente eran tecnologías restringidas o sólo disponibles en el ámbito empresarial, se han ampliado a gran escala dirigiéndose al mundo de las tecnologías de las redes públicas. Hay que señalar que estas tecnologías sufren todavía ciertas limitaciones que hay que considerar, como es el hecho de trabajar en bandas de frecuencia abiertas, de uso no privativo y de escasa seguridad. El WiMAX se presenta como la tecnología con más recorrido, aunque todavía no está tan extendida como la WiFi, ya ha sido diseñada para poder dar solución a los principales objetivos tecnológicos de la comunicación de banda ancha.

1.2 Motivación del proyecto

El gran aumento de uso y la progresión que ofrecen WiFi y WiMAX en el mundo de las telecomunicaciones supone la clara necesidad de estudio de la propagación para las frecuencias de trabajo en las que operan estos sistemas.

Adicionalmente, existe escasa información con respecto a las pérdidas de inserción que se pueden llegar a producir en las bandas de frecuencia de estas tecnologías, por lo que será necesario un análisis significativo y completo de las características de estas bandas y los factores que pueden repercutir en el estudio de las coberturas ofrecidas para los diferentes escenarios.

Estos escenarios representarán diferentes tipos de obstáculos que podemos encontrarnos en un radio enlace, por lo que será necesario una gran variedad de los mismos y que estos ofrezcan un gran impacto por ser comunes en el ámbito cotidiano cuando se quiere conectar un usuario a un punto o red inalámbrica.

1.3 Objetivos y enfoque

El objetivo del proyecto es el análisis de las redes de comunicación en las bandas de frecuencia en las que trabajan las tecnologías anteriormente descritas, WiFi y WiMAX. Particularmente la observación de las pérdidas de inserción que se producen en los enlaces transmisión-recepción debidas a obstáculos en interiores y exteriores.

Las pérdidas por inserción representan la reducción que sufre la señal en dB, cuando entre emisor y receptor, se inserta un material. Estas pueden ser paredes, ventanas, puertas, personas o cualquier objeto que se pueda encontrar en el interior de un edificio o en un recinto cerrado. En el exterior podemos encontrar también algunos de estos tipos de obstáculos, así como también la vegetación y árboles, unos de los más importantes factores a tener en cuenta en un radioenlace exterior.

Generalmente los enlaces WiFi sitúan sus antenas transmisoras y receptoras en entornos cerrados (entornos indoor), mientras que las redes WiMAX suelen situarse en el interior y sobretodo en el exterior (entornos outdoor).

Todos los posibles resultados que se analicen durante el proyecto pretenden servir de apoyo para el estudio de la cobertura de cada uno de estos diferentes sistemas, de tal manera que genere un impacto y una serie de pautas a tener en cuenta cuando se quiera realizar un determinado enlace inalámbrico. Por ello el objetivo principal será el análisis de las pérdidas de inserción producidas por estos materiales para las tres frecuencias en las que trabaja este tipo de tecnologías:

- 2.4 GHz
- 3.3 GHz
- 5.5 GHz

1.4 Plan de trabajo y medios disponibles

Las pérdidas por inserción de los materiales se miden en muestras, generalmente planas, del material que interese, procurando que el montaje y la medida en sí no dependan del tamaño de la muestra, siempre que se supere un tamaño mínimo, aunque sí dependerán de su espesor. Mientras que en los árboles o vegetación, observaremos el efecto que tienen las diversas formas de la copa, tronco, ramificación, hojas, así como la altura que tenga con respecto al enlace.

Por ello la metodología de análisis será muy particular, donde los enlaces se realizaran en distancias cortas donde el obstáculo se interponga de manera inmediata entre el transmisor y el receptor, y los factores que puedan alterar el enlace, y por tanto un falseo de la medida, no afecten de manera significativa en el análisis de las pérdidas de inserción. Observaremos también otros factores como la polarización o la altura de las antenas en el radioenlace, así como también los diferentes puntos del obstáculo donde podrían existir más o menos pérdidas de inserción.

Los medios disponibles para realizar este estudio serán los propios para poder establecer un radio enlace corto, de los cuales hablaremos más detalladamente en el Capítulo 5. Por último, destacar que para realizar las graficas y representaciones oportunas para cada escenario, se ha utilizado la herramienta “Matlab”, idónea para caracterizar modelos matemáticos o representar datos de forma correcta y visual para el investigador. Los resultados se mostrarán en forma de tablas, o bien en forma de gráficas, en las que se mostrarán distintos parámetros que se quieran comparar. Por otro lado, los escenarios a estudiar serán los más representativos, los cuales posean unas características muy atractivas para su estudio y que puedan encontrarse en cualquier caso real de radioenlace.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

2.1 Redes inalámbricas

Una red inalámbrica es aquella que permite conectar diversos nodos sin utilizar conexiones físicas como pueden ser los cables, en vez de ello, la comunicación se establece mediante ondas electromagnéticas. Así mismo la transmisión y la recepción de los datos en la comunicación requieren de dispositivos que actuarán como puertos.

Las redes inalámbricas permiten una mayor comodidad y un ahorro de dinero en infraestructura gracias a la ausencia del medio físico de transporte. Por otra parte este tipo de redes suele contar con una seguridad menor ya que, si no se dispone de una protección adecuada, existe una clara amenaza de intrusos u otros factores que podrían afectar al sistema. Aun así las pequeñas empresas o usuarios pueden disfrutar de muchas ventajas utilizando una red inalámbrica:

- **Comodidad:** Se tiene acceso a los recursos de red desde cualquier posición dentro del área de cobertura de la red inalámbrica.
- **Movilidad:** Debido a la ausencia de cables, el usuario dispone de una gran libertad a la hora de elegir una zona de trabajo o conexión a la red.
- **Productividad:** El acceso inalámbrico a Internet, las aplicaciones y los recursos ofrecidos ayudan al usuario a realizar su trabajo con mayor eficacia así como puede en una empresa fomentar la colaboración en grupo.
- **Instalación sencilla:** Al no ser necesario el cableado, la instalación puede ser rápida y barata.
- **Capacidad de ampliación:** Se puede ampliar fácilmente la capacidad de las redes inalámbricas aumentando el equipo ya existente, mientras que una red por cable requiere cableado adicional y por tanto una necesidad mayor de espacio de instalación para el sistema.
- **Menor coste:** Puesto que las redes inalámbricas eliminan los costes por cableado, su dimensionado resulta ser más económico que el de las redes por cable.

Existe una gran variedad de despliegues según la cobertura solicitada cuando se trata de redes inalámbricas. Por ejemplo una la red WPAN es frecuente en uso de tecnologías domesticas de corto alcance como Bluetooth, mientras que los sistemas WiFi se suelen establecer con un área más extensa como las redes WLAN. Las tecnologías basadas en WiMAX, por su parte, permiten establecer redes WMAN abarcando una ciudad o vecindario, mientras que las redes WAN se usan para comunicaciones móviles como GSM, HDSPA¹ o 3G², donde se puede abarcar un cobertura bastante más grande que en una área meramente metropolitana.

Por tanto de acuerdo al tipo de cobertura, la red inalámbrica puede clasificarse como:

- **Wireless Personal Area Network (WPAN)**
- **Wireless Local Area Network (WLAN)**
- **Wireless Metropolitan Area Network (WMAN)**
- **Wireless Wide Area Network (WAN)**

¹HDSPA (High Speed Downlink Packet Access)

²3G: Tercera Generación. El estándar formal para 3G es el IMT-2000 (International Mobile Telecommunications 2000)

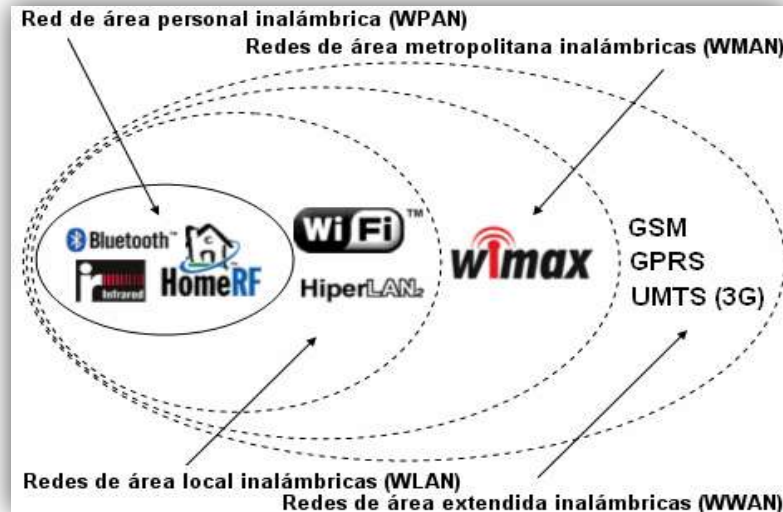


Figura 2.1: Esquema de las redes inalámbricas según la cobertura

2.2 WiFi

Las redes WiFi están basadas en las tecnologías de transmisión de datos sin hilos y su objetivo principal es la conexión de dispositivos próximos entre sí, a distancias entre 100 y 300 metros, proporcionando altas velocidades similares a las producidas en las redes cableadas. Las conexiones WiFi utilizan las bandas de uso común de 2,4 GHz y 5 GHz y operan en el conjunto de estándares 802.11. Así mismo hay que señalar que estas bandas de operación no requieren de licencia y su potencia suele ser limitada. [1][2]



Figura 2.2: Logotipo de WiFi

2.2.1 Aplicaciones y características

Anteriormente la banda de 2,4 GHz era la banda en la que operaban los estándares WiFi que incorporaban la mayoría de los routers domésticos, y esto es debido a que el canal estaba disponible casi internacionalmente, con una velocidad que abarcaba los 11 y 54 Mbps. En la actualidad, el estándar WiFi que se está implementando y desarrollando en los nuevos routers es el estándar IEEE 802.11n que opera en la banda de 5 GHz.

Este canal no presenta casi interferencias debido a que la banda no se comparte con otras tecnologías inalámbricas como por ejemplo bluetooth, HomeRF³ o Zigbe⁴. Otro factor a destacar es la consecución de velocidades más altas de transmisión, las cuales están en torno a 300 Mbps.

En los últimos años, las conexiones WiFi se han extendido a un mayor número de ámbitos y aplicaciones. Cada vez son más los dispositivos compatibles con esta tecnología inalámbrica. Actualmente, las redes inalámbricas de área local WiFi se emplean para dar acceso a Internet a partir de diferentes tipos de red o puntos de acceso, siempre teniendo en cuenta la necesidad del usuario o grupo de usuarios. Este despliegue puede ser de tres tipos:

- **Red Interna:** En una empresa es posible acceder a la red corporativa mediante un acceso WiFi. Asimismo, en un domicilio particular se crea una red WiFi para conectar varios ordenadores a un modem ADSL⁵.
- **Provisión de Acceso:** Encontramos varios accesos a Internet WiFi en diferentes lugares cotidianos, por ejemplo en el hall de un hotel o en un aeropuerto. A través del portátil o de un Smartphone podemos usar todos los recursos de red que ofrece este despliegue.
- **Red WiFi Municipal:** A diferencia de las anteriores, estas redes implican un despliegue con un elevado número de puntos de acceso interconectados entre sí para aumentar así el área de cobertura. A este tipo de red se le denomina “Red Mallada”. [3]



Figura 2.3: Ejemplos de despliegue Red WiFi

³ HomeRF: Tecnología cuyo estándar se basa en el teléfono inalámbrico digital mejorado (Digital Enhanced Cordless Telephone, DECT).

⁴ Zigbe: Especificación de un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica para su utilización con radiodifusión digital de bajo consumo.

⁵ ADSL (Asymmetrical Digital Subscriber Line)

2.3 WiMAX

La tecnología WiMAX se emplea actualmente para crear redes de transmisión de datos de forma inalámbrica en el área metropolitana y es capaz de soportar múltiples servicios de banda ancha. Es una potente solución a las necesidades de redes de acceso inalámbricas de banda ancha, de amplia cobertura y elevadas prestaciones. Ofrece una gran capacidad hasta 75 Mbps por cada canal de 20 MHz, e incorpora mecanismos para la gestión de la calidad de servicio QoS⁶.



Figura 2.4: Logotipo de WiMAX

WiMAX permite amplias coberturas tanto con línea de visión (LOS⁷) como sin línea de visión (NLOS⁸) y permite conexiones fijas punto a multipunto, lo que lo hace especialmente indicado para el entorno rural. Al contrario de WiFi, en WiMAX existen bandas de frecuencia con licencia y sin licencia. Esta división se estableció para cubrir tanto demandas particulares, como eventos, campus educativos, empresas, o zonas geográficas donde sea necesario un operador de red y por tanto una mejor utilización de estas bandas. Por último destacar que las bandas con licencia son 2.3 GHz, 2.5GHz, 3.3GHz y 3.5GHz y las bandas sin licencia 5GHz y 5.8GHz. [4]

2.3.1 Aplicaciones y características

Las aplicaciones típicas de la tecnología WiMAX son la conexión a la red de acceso Internet de alta velocidad tanto en el ámbito doméstico como en el profesional, especialmente en aquellas zonas sin cobertura. En cuanto a la capacidad, una de sus ventajas clave es que utiliza OFDM, lo que permite altas velocidades de transferencia para el usuario, equivalentes a las obtenidas con tecnologías de cable incluso en condiciones NLOS multipath de banda ancha. Por otro lado, tenemos una mayor cobertura. La tecnología que soporta WiMAX ha sido optimizada para ofrecer NLOS, es decir, una mejor cobertura, mejor predicción sobre su potencial de cobertura y menores costes, lo que lleva a que se precise un menor número de estaciones base, planificación radio más sencilla, torres más cortas y terminales de usuarios que se instalan más rápido. Es conveniente comentar que además existen técnicas para mejorar la cobertura del NLOS, como diversidad, codificación espacio-tiempo y ARQ⁹. Dada la cobertura de WiMAX y su NLOS, esta solución es muy atractiva para entornos rurales donde redes cableadas de banda ancha no son viables.

⁶ QoS (Quality of Service)

⁷ LOS (Line of Sight)

⁸ NLOS (non-line of sight)

⁹ ARQ (Automatic Repeat Request)

Actualmente, las redes WiMAX se emplean para dar acceso a Internet en los siguientes casos:

- **WiMAX fijo:** Usa las bandas de frecuencias de 3,5 GHz (uso privativo) y 5,8 GHz (no privativo). Dispone de una capacidad por usuario de 512 Kbps a 4 Mbps, un radio de cobertura de hasta 50 km y emplea antenas directivas, es decir, puntos de acceso fijos, de alta ganancia. Este tipo de sistema normalmente es usado para dar servicios de telefonía e Internet de banda ancha a los usuarios de la red.
- **WiMAX móvil:** Es una evolución del WiMAX fijo que proporciona servicios de banda ancha móvil y gestión de movilidad. Utiliza las bandas de frecuencias de 2,3 GHz, 2,5 GHz y de 3,5 GHz. Aun así WiMAX móvil presenta velocidades y áreas de cobertura inferiores respecto a las disponibles en WiMAX fijo.
- **WiMAX 2:** Esta reciente tecnología ofrece una mejora de calidad y de velocidad para el usuario de 120Mbps de bajada y de 60 Mbps de subida simultáneamente junto a una menor latencia y mayor capacidad de VoIP¹⁰. Este sistema funciona en frecuencias inferiores a los 11 GHz.

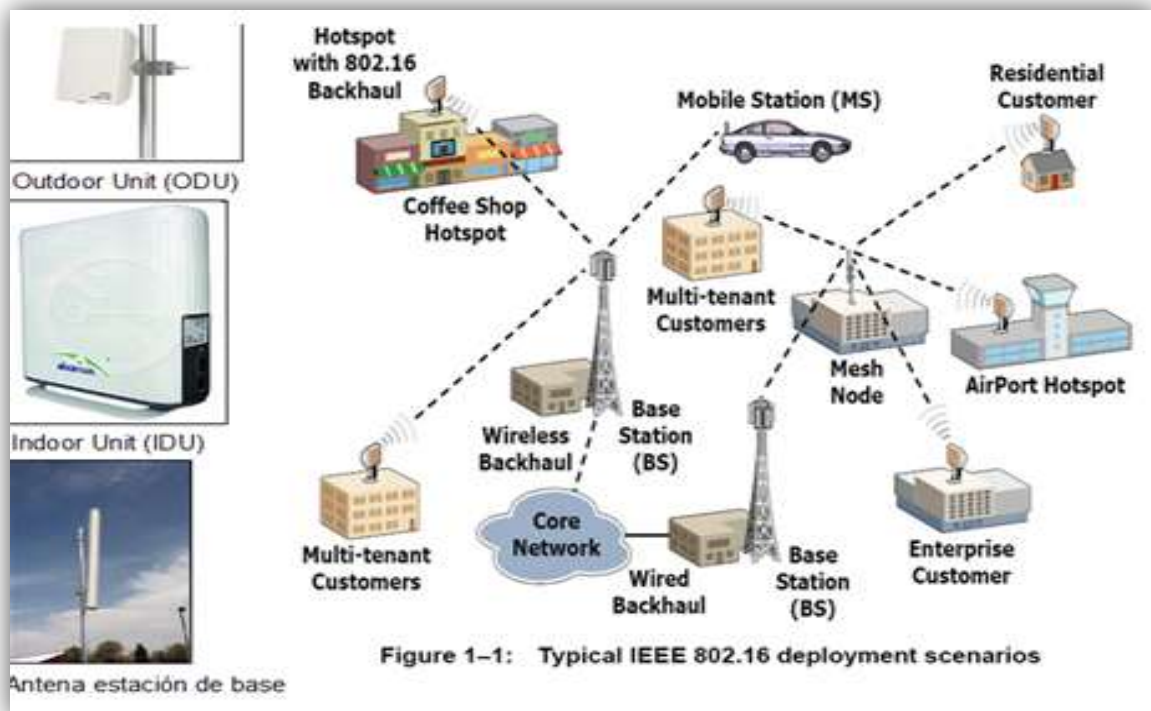


Figura 2.5: Ejemplos de despliegue Red WiMAX

¹⁰ VoIP (Voice over IP)

2.4 Trabajos relacionados

En las comunicaciones inalámbricas, las diferentes mediciones que se realicen de las pérdidas debidas a diversos fenómenos durante la propagación, son de vital importancia para el estudio o caracterización de un radioenlace [5] [6]. Los posibles mecanismos de propagación pueden ser por espacio libre, con y sin multitrayecto, transmisión a través de diversos materiales, paredes, pisos, puertas y los efectos que se podrían producir dependiendo de su estructura, como la difracción o la reflexión. Este tipo de estudios están activos actualmente, y son de interés general en el ámbito de las comunicaciones.

En artículos como [7] [8] [9], se estudian este tipo de pérdidas para diferentes tipos de escenarios y sus mecanismos de propagación en los mismos. En [10] [11] [12], el cuerpo humano es objeto de medición en enlaces de corta distancia para interiores, donde la pérdidas de inserción rondan los 30 dB a 5,5 GHz cuando la persona se interpone en línea de visión directa entre la antena transmisora y la receptora. Así mismo, podemos encontrar en [7], estudios sobre cómo afecta el cuerpo humano en la propagación, en enlaces de corta distancia en interiores para bandas entre (3 – 11) GHz, donde también se observa que las pérdidas de inserción rondan los 30 dB para 5,5 GHz.

En [13], se estudia en un radioenlace el efecto de una puerta de metal situada en interiores. Para la campaña de medición se analizan tres bandas de frecuencia, (850 – 950) MHz, (2.4 – 2.5) GHz y (5.1 – 5.3) GHz, donde se observa que la atenuación producida es mayor que 40 dB en la banda de 5.2 GHz. En [14], se realizan mediciones de propagación en exteriores e interiores en zonas rurales donde se estudian las pérdidas para un enlace inalámbrico en banda ancha. En [15], podemos observar cómo se combinan los rayos ópticos y FDTD (Diferencias finitas en el dominio del tiempo) como métodos de propagación para calcular estas pérdidas en interiores.

Por tanto, el objetivo principal es ampliar este tipo de estudios, corroborando y presentando las pérdidas producidas por diferentes materiales en las bandas de 2,4, 3,3 y 5,5 GHz disponibles para nuestro proyecto, y elegidas por ser las empleadas en tecnologías inalámbricas como WiFi y WiMAX.

CAPÍTULO 3

FÍSICA RADIO

3.1 Campos y ondas electromagnéticas

Las comunicaciones inalámbricas hacen uso de las ondas electromagnéticas para enviar señales a través de largas distancias. Desde la perspectiva del usuario, las conexiones inalámbricas no son diferentes a cualquier otra aplicación como el uso del navegador web, correo electrónico u otras aplicaciones, las cuales funcionan de la misma manera independientemente del medio de comunicación o red. Aun así, cabe destacar que las ondas de radio tienen algunas propiedades inesperadas en una comunicación inalámbrica que con respecto a la red por cable. En las redes inalámbricas las señales se transmiten a través de las ondas electromagnéticas, siendo el aire el medio de propagación de las mismas, a diferencia de las comunicaciones cableadas donde las ondas viajan a través de un cable como pueden ser el par trenzado, el cable coaxial o la fibra óptica, entre otros. Los cables concentran las señales dentro de sí aislándolas, mientras que en una transmisión inalámbrica las señales sufren efectos físicos como reflexión, refracción, absorción y otros fenómenos que trataremos más adelante. Las ondas electromagnéticas por tanto difieren de las mecánicas en que no necesitan de un medio físico para propagarse.

La radiación electromagnética, conocida también como onda electromagnética, es una onda que se propaga en el espacio con componentes eléctricos y magnéticos. Los componentes eléctricos y magnéticos oscilan perpendiculares uno respecto al otro y en dirección a la línea de propagación tal y como representa la siguiente figura:

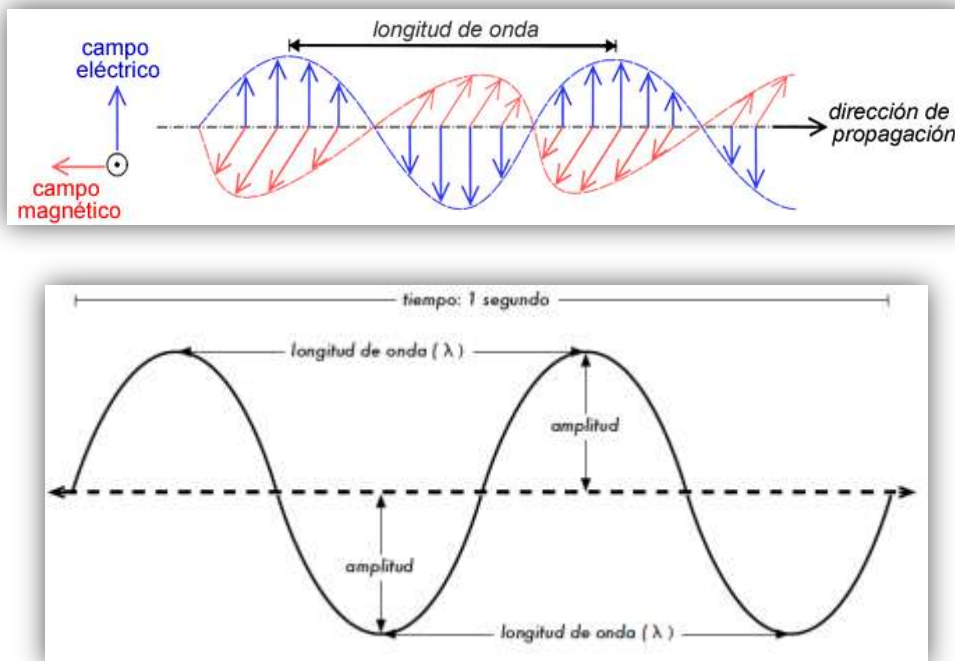


Figura 3.1 y 3.2: Caracterización de una onda electromagnética

La velocidad de propagación, longitud de onda y frecuencia de las ondas electromagnéticas están relacionadas por la siguiente expresión:

$$\text{Velocidad (v)} = \text{Frecuencia (f)} * \text{Longitud de Onda (\lambda)}$$

Donde:

- λ (m): longitud de onda es la distancia medida desde un punto en una onda hasta la parte equivalente de la siguiente, por ejemplo desde la cima de un pico hasta el siguiente.
- f (Hz): frecuencia es el número de ondas que pasan por un punto fijo en un segundo.

Las ondas también tienen una propiedad denominada amplitud, esta es la distancia desde el centro de la onda hasta el extremo de uno de sus picos. Así mismo dependiendo de su polarización, la onda puede describir diferentes formas de propagación. La polarización es por tanto otra característica destacable a la hora de caracterizar una onda electromagnética y se define como la dirección del campo eléctrico de una onda cuando se propaga en un medio. Esta puede ser lineal, elíptica o circular, tal y como se muestra en la siguiente figura:

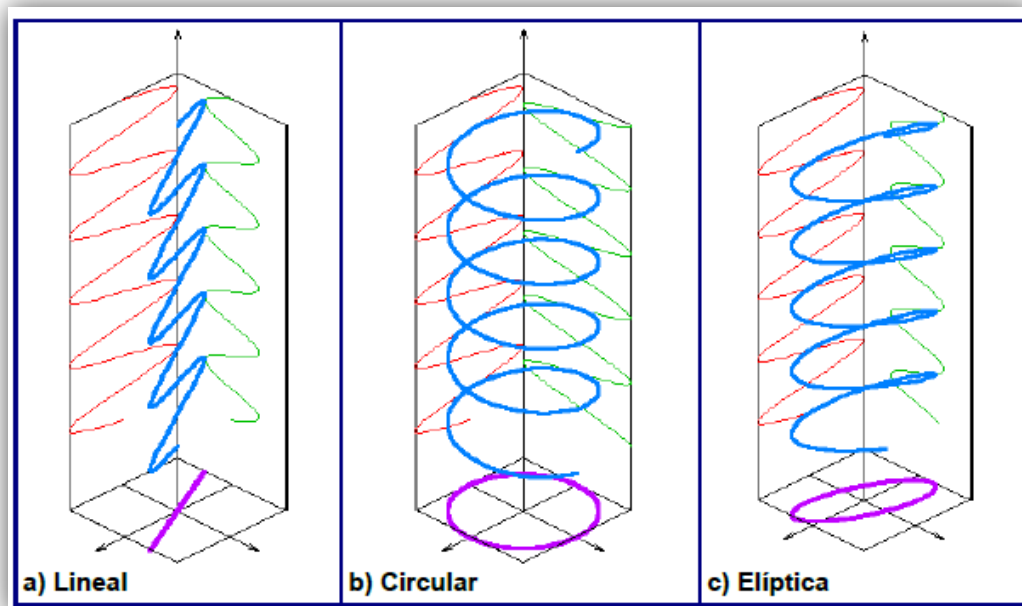


Figura 3.3: Tipos de polarización en la propagación de una onda electromagnética

3.2 Espectro electromagnético

El espectro electromagnético es el conjunto de las posibles longitudes de onda o rango de todas las radiaciones electromagnéticas posibles. La banda de radiofrecuencia cubre desde unos pocos KHz, hasta muchos GHz, por lo que se extiende desde las frecuencias bajas como las producidas por ciertas nebulosas estelares de alrededor de 30 Hz (extremo de la onda larga) hasta los rayos gamma (extremo de la onda corta).

En la siguiente figura podemos observar la esta división de las diferentes bandas espectrales y la relación entre diferentes variables:

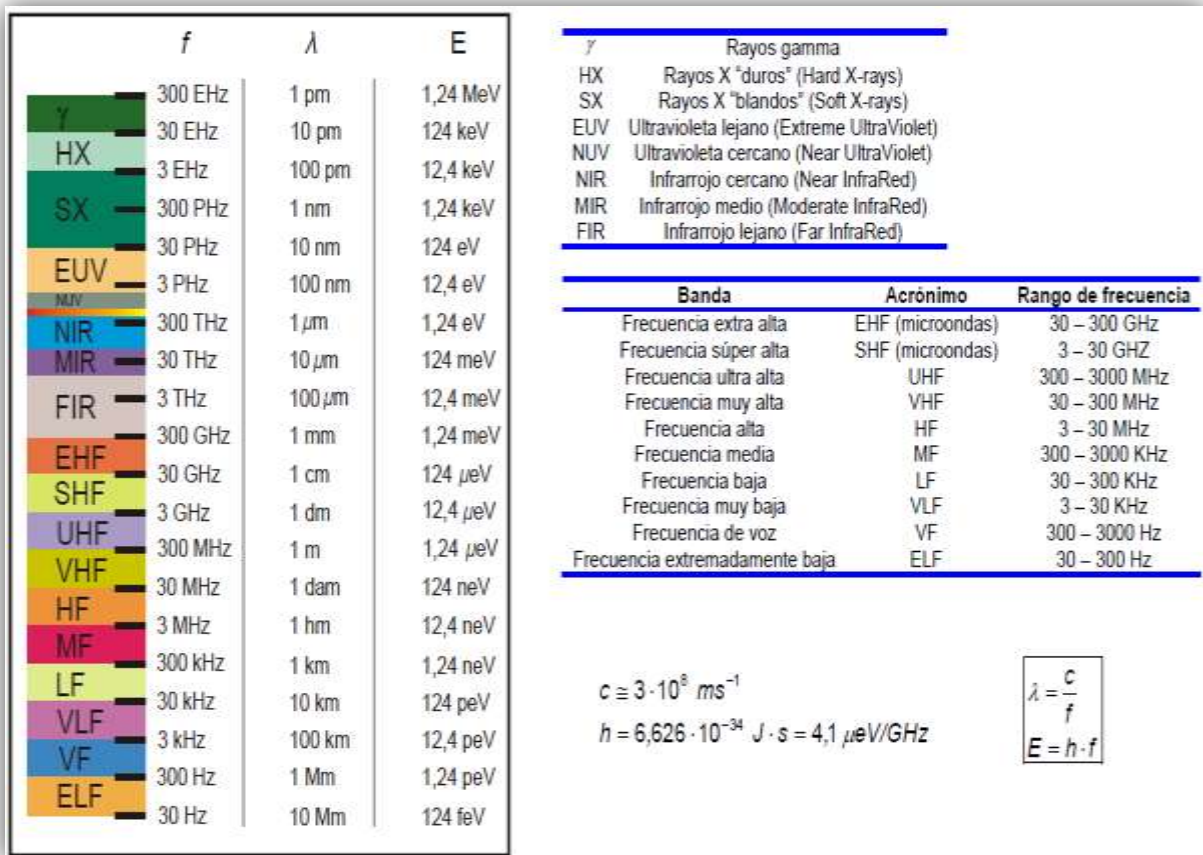


Figura 3.4: Espectro Electromagnético

La energía electromagnética posee una longitud de onda particular λ (en el vacío) la cual tiene una frecuencia asociada “f” y una energía fotónica “E”. Así, el espectro electromagnético puede expresarse en términos de cualquiera de estas tres variables, que están relacionadas mediante ecuaciones anteriores de la parte inferior de la figura.

Las bandas UHF (ondas radio) y SHF (microondas) serán las utilizadas a lo largo del proyecto ya que caracterizan las tecnologías WiFi y WiMAX y son el rango de frecuencias donde van a trabajar nuestras antenas: 2,4 GHz, 3.3 GHz y 5.5 GHz.

3.3 Mecanismos de propagación

En el siguiente apartado trataremos de identificar los diferentes métodos de propagación en las comunicaciones inalámbricas y señalaremos los factores y teorías que constatan estos efectos que puede sufrir la señal. [16]

3.3.1 El principio de Huygens

El principio de Huygens es un método de análisis aplicado a los problemas de la propagación de ondas en el límite de campo lejano. Establece que cada punto de un frente de onda que avanza es, de hecho, el centro de una nueva perturbación y la fuente de un nuevo tren de ondas; y que esa onda avanzando en conjunto puede ser definido como la suma de todas las ondas secundarias surgidas por el medio ya atravesado.

Este principio va a ayudarnos a comprender los mecanismos de propagación, tanto la difracción como las zonas Fresnel, la necesidad de línea visual, y el hecho de que algunas veces las ondas voltean las esquinas, más allá de la línea visual.

3.3.2 Propagación y pérdidas en el espacio libre

Cuando una onda se propaga en el espacio o en el aire, se esparce sobre una superficie cada vez mayor a medida que se aleja del transmisor. La potencia que se puede apreciar en el receptor, disminuye con el cuadrado de la distancia al transmisor. A esto se le denomina “Pérdida en el Espacio Libre (FSL)” y su cálculo viene dado por dos tipos de expresiones que varían según la distancia del enlace:

$$\mathbf{FSL (dB) = 20\log_{10} (d_1) + 20\log_{10} (f) + 32.44}$$

$$\mathbf{FSL (dB) = 20\log_{10} (d_2) + 20\log_{10} (f) + 92.44}$$

Donde:

- d_1 (m) : Distancia para enlaces de corto alcance (unos metros hasta 1 Km).
- d_2 (Km) : Distancia para enlaces de largo alcance (superiores a 1 Km).
- f (GHz) : Frecuencia de operación.

3.3.2.1 Línea Visual y Zonas de Fresnel

A medida que avanzan los haces de onda por un determinado medio, estos comienzan a ensancharse. A su vez las ondas microondas usadas en las redes inalámbricas tienen una longitud de onda de unos pocos centímetros y por consiguiente, sus haces son más anchos y necesitan más espacio, es decir una línea visual (LOS) con una determinada anchura.

Por lo que surge la necesidad de caracterizar un cierto espacio para que la onda no se vea afectada y pierda las características desde el inicio de su propagación. De ahí el concepto de las Zonas de Fresnel.

Sabemos por el principio de Huygens que por cada punto de un frente de onda comienzan a surgir nuevas ondas circulares y estas pueden interferir unas con otras. La teoría de la Zona de Fresnel examina a la línea desde la transmisión hasta la recepción y luego al espacio alrededor de esa línea que contribuye a lo que está llegando a la antena receptora.

Algunas ondas viajan directamente desde la antena transmisora hasta la receptora, mientras que otras lo hacen en trayectorias indirectas. Consecuentemente, su camino es más largo, introduciendo un desplazamiento de fase entre los rayos directos e indirectos. Siempre que el desplazamiento de fase es de una longitud de onda completa, se obtiene una interferencia constructiva: las señales se suman óptimamente, es decir, existe zonas anulares alrededor de la línea visual que contribuyen a que la señal llegue al punto de recepción. De ahí la definición de varias Zonas de Fresnel.

Específicamente, si la “Zona I” de Fresnel fuera bloqueada por un obstáculo, ya sea un árbol o un edificio, la señal será atenuada. Entonces, cuando planeamos enlaces inalámbricos, debemos asegurarnos de que esta “Zona I” de fresnel va a estar libre de obstáculos, es decir, que se considere meramente propagación por espacio libre. En la práctica en redes inalámbricas nos conformamos con que al menos el 60% de la “Primera Zona de Fresnel” esté libre.

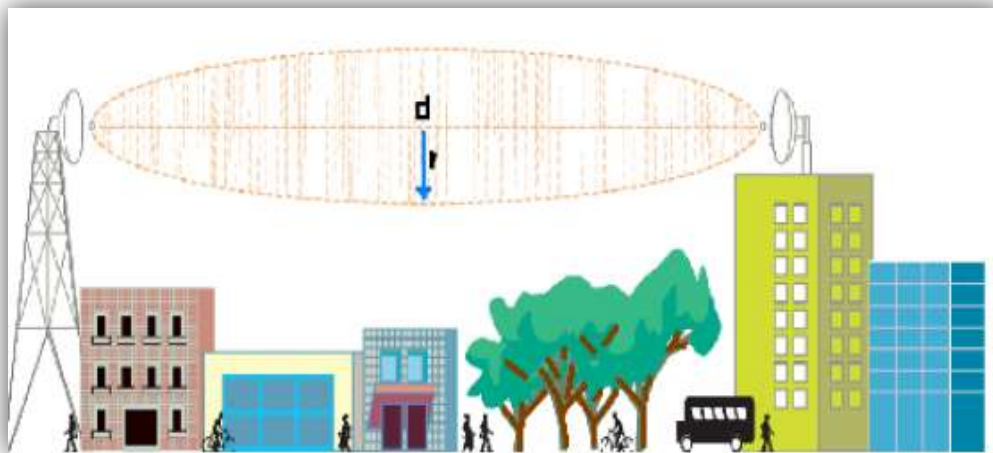


Figura 3.5: Representación de la Zona de Fresnel.

3.3.3 Propagación y pérdidas a través de otros medios

Las interacciones de las ondas electromagnéticas con varios objetos en el ambiente, así como la tierra, edificios, vegetación, farolas, personas, etc. están comúnmente asociados a otros mecanismos de propagación. Estos mecanismos de propagación también causan atenuación de las ondas electromagnéticas y gracias al principio de Huygens podremos entender mejor de alguna manera los siguientes efectos en la propagación de las ondas.

3.3.3.1 Difracción

La difracción es el comportamiento de las ondas cuando al incidir en un objeto dan la impresión de doblarse y esparcirse. A este efecto se le suele denominar: “Ondas doblando las esquinas”. El Principio de Huygens provee un modelo para comprender este comportamiento y este determina que cada punto del frente de onda puede ser considerado como el punto de inicio de otra onda esférica. Es por ello que por este efecto las ondas van a “Doblar” las esquinas, o van a atravesar una abertura en un obstáculo.

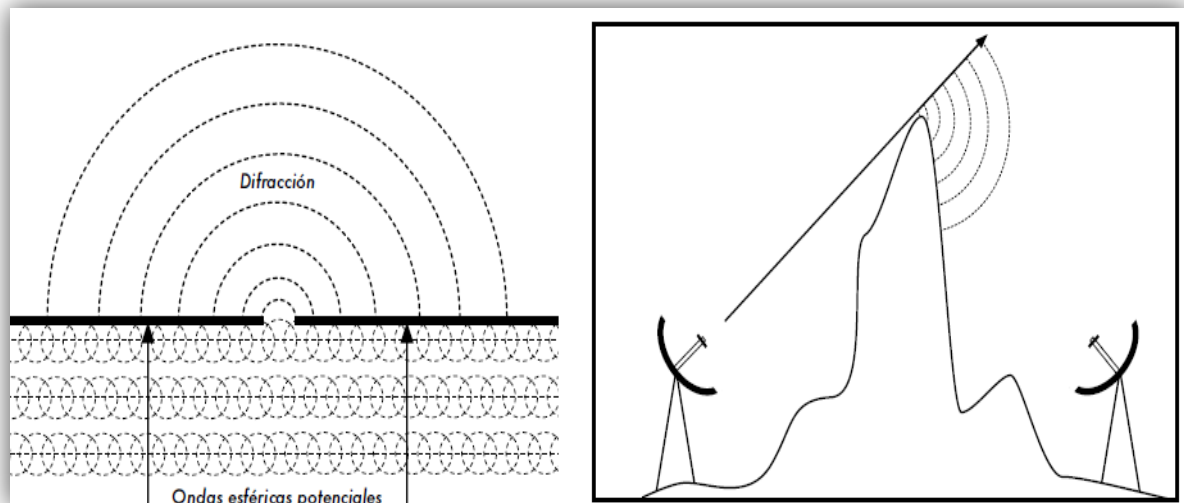


Figura 3.6: Efecto de la Difracción

Por tanto se demuestra con este fenómeno que las ondas no se propagan en una única dirección. Las ondas que encuentran un obstáculo en su trayectoria divergen en muchos haces y este fenómeno se incrementa en función de la longitud de onda, de tal manera que, la trayectoria de la onda que se aleja de la “Línea de Vista” será mayor en la medida que la “ λ ” utilizada sea más alta.

3.3.3.2 Reflexión

En el ámbito de la radio frecuencia, la reflexión ocurre principalmente en el metal, pero también en superficies de agua y otros materiales con propiedades similares. El principio básico define que una onda se refleja con el mismo ángulo que con el que impacta en una superficie. En el caso de que la superficie no sea plana ideal, la dirección de las reflexiones dependerá del plano o curvatura en el que incide, lo que supone a veces una ventaja en el diseño de algunas antenas. Es el caso de las antenas parabólicas detrás del transmisor o receptor se pueden recoger las ondas de radio que no se detectan en el punto de recepción o transmisión y concentrarlas en ese mismo punto.

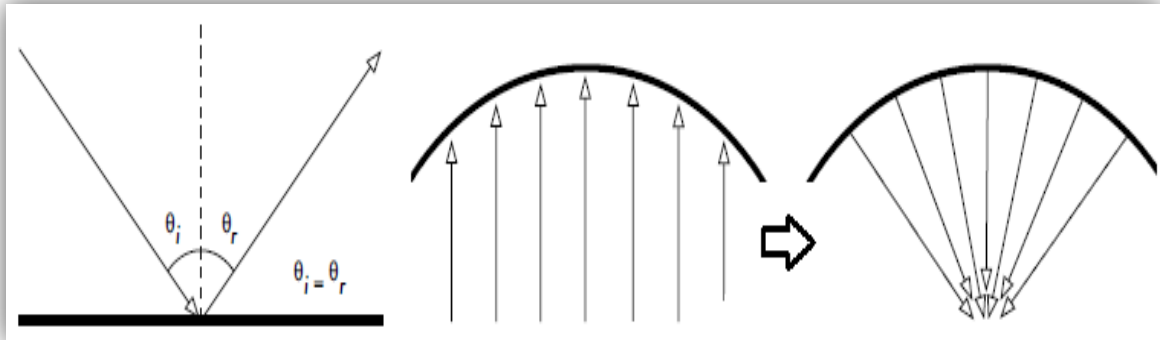


Figura 3.7: Efecto de la Reflexión

En función de la rugosidad de la superficie podemos destacar dos tipos de obstáculos reflectores:

- **Reflectores Especulares:** Donde la incidencia es en una superficie plana que manifiesta la reflexión como si fuese un espejo, donde el ángulo de reflexión es igual al de incidencia. En el caso de no ser plana, la reflexión dependerá de la forma de la curva de la superficie dejando de ser el mismo ángulo que el de incidencia.
- **Reflectores Difusos:** Las ondas se reflejan infinitamente en todas direcciones.

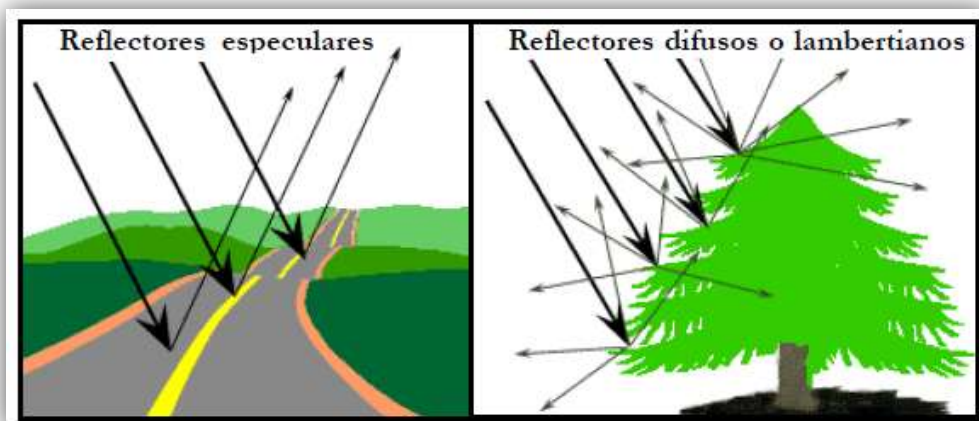


Figura 3.8: Tipos de Reflectores

Debemos señalar también la polarización como otro parámetro destacable a la hora de interpretar el efecto de la reflexión. Las ondas de diferente polarización, en general, van a ser reflejadas de forma diferente, ya que el campo eléctrico incidirá de una determinada manera, y dependiendo de la superficie, las ondas se reflejarán acorde a la superficie de incidencia.

A pesar de que las reglas de reflexión son bastante simples, las cosas pueden complicarse mucho cuando imaginamos el interior de una oficina o exteriores, con varios objetos de metal de formas variadas y complicadas donde los criterios de reflexión pueden llegar a ser bastante complejos.

3.3.3.3 Refracción

La refracción es la desviación aparente de las ondas cuando atraviesan un medio con composición diferente. Cuando un frente de onda pasa de un medio a otro de diferente composición, cambia de velocidad y en consecuencia de dirección de propagación.

Por tanto la refracción es el cambio de dirección de una onda electromagnética conforme pasa oblicuamente de un medio a otro, con diferentes velocidades de propagación. La refracción ocurre siempre que una onda electromagnética pasa de un medio a otro de diferente densidad donde el ángulo de incidencia es el formado entre la onda incidente y la normal, y del mismo modo, el ángulo de refracción es el formado entre la onda refractada y la normal.

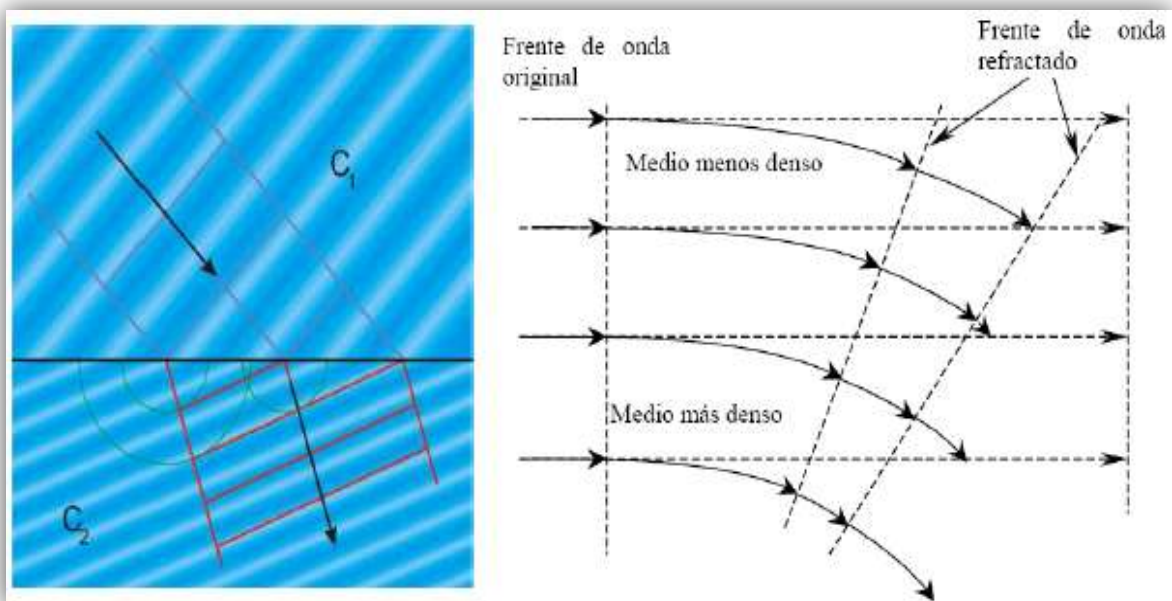


Figura 3.9: Efecto de la Refracción

En las redes WiFi este fenómeno suele producirse en escasas ocasiones, por lo que no es muy significativo. Si es más significativo en una red WLAN de largo alcance o redes WiMAX.

3.3.3.4 Absorción

Cuando las ondas electromagnéticas atraviesan algún material, generalmente se debilitan o se atenúan. La cantidad de potencia perdida va a depender de su frecuencia y por supuesto, del material. La potencia decrece de manera exponencial y la energía absorbida generalmente se transforma en calor. En las redes inalámbricas, se considera al metal y el agua como absorbentes perfectos, es decir, generalmente no van a ser atravesados, aunque capas finas de agua podrían permitir que una parte de la potencia de la onda electromagnética pudiera atravesar. Cuando hablamos del agua, tenemos que recordar que la misma se encuentra en diferentes formas, ya sea lluvia, niebla, vapor o nubes bajas, todas ellas van a estar en el camino de los radioenlaces y tienen que ser consideradas.

Existen otros materiales que tienen un efecto más complejo en la absorción de la radiación electromagnética, por ejemplo, la absorción en los árboles, donde el factor de la absorción dependerá de cuánta cantidad de agua y de los otros compuestos químicos que contenga la propia madera o sus propias hojas. Por otro lado, los plásticos y materiales similares, no absorben mucha energía radio magnética, pero esto variará dependiendo de la frecuencia y el tipo de material.

Podemos hacernos una idea de la repercusión que tiene la absorción en diferentes materiales en la siguiente tabla:

Tabla 1: Tipos de Interferencia por Absorción para diversos tipos de materiales

Material	Ejemplo	Interferencia
Madera	Tabiques	Baja
Vidrio	Ventanas	Baja
Amianto	Techos	Baja
Yeso	Paredes interiores	Baja
Ladrillo	Paredes interiores y exteriores	Media
Hojas	Arboles y plantas	Media
Agua	Lluvia / Niebla	Alta
Cerámica	Tejas	Alta
Papel	Rollos de papel	Alta
Vidrio con alto contenido en plomo	Ventanas	Alta
Metal	Vigas, armarios	Muy Alta

Otro tipo de obstáculo a tener en cuenta en la absorción son los seres humanos, mayormente porque estamos compuestos por un altísimo porcentaje de agua. En lo que a redes inalámbricas se refiere, podemos ser descritos como grandes bolsas llenas de agua las cuales producen una fuerte absorción de las ondas. Orientar un punto de acceso en una oficina de forma que su señal deba pasar a través de muchas personas puede repercutir a un error grave de implementación de la red, y es que la cantidad de personas que pueden existir en un escenario en concreto deben tenerse muy en cuenta, sobre todo por las pérdidas de señal que se pueden llegar a producir en el radioenlace. Lo mismo sucede en clubes nocturnos, cafés, bibliotecas e instalaciones externas, donde puede haber grandes grupos de personas.

3.3.3.5 Multitrayecto

La Multitrayectoria, es el fenómeno el cual las señales pueden recibirse en el receptor a través de diferentes caminos, y por consiguiente en tiempos diferentes. Este fenómeno juega un papel muy importante en las redes inalámbricas por los retardos e interferencia que pueden ocasionar.

Las diferentes trayectorias resultantes para cada onda principal suelen conllevar pequeños y numerosos retardos, los cuales tienen diferentes valores de fase debido a las diferentes longitudes de las trayectorias. El número de las trayectorias distinguidas en una medida determinada o en un punto dado del espacio así como otras ondas derivadas como las ondas reflejadas, dependen de la forma y la estructura del entorno en el que se realiza en radioenlace.

Algunas señales ayudarán a la trayectoria directa (interferencia constructiva), mientras que otras señales afectarán negativamente al recorrido directo de la señal (interferencia destructiva).

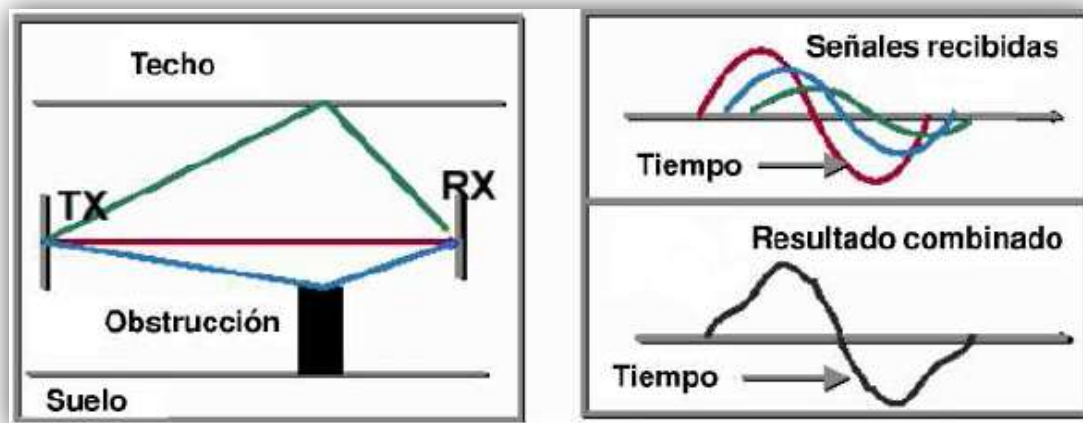


Figura 3.10: Efecto del Multitrayecto

Por lo tanto, para el caso de utilización de canales radio en interiores, podemos destacar que va a ser caracterizado mayormente por la recepción por multitrayectoria, donde la señal ofrecida al receptor está compuesta no solamente de ondas de radio directas a la línea de visión entre el transmisor y el receptor (LOS), sino también de una gran cantidad de ondas de radio reflejadas, dispersadas o difractadas por estructuras tales como paredes, suelos, objetos, etc.

Este efecto debe tomarse muy en cuenta en el uso de tecnologías inalámbricas, no solo por sus posibles beneficios como aumentar niveles de intensidad radiada, sino también por sus perjuicios como pueden ser los falseos experimentales en una medida determinada.

CAPÍTULO 4

TEORÍA DE ANTENAS

4.1 Antenas. Definición y características

La antena es la parte de los sistemas de telecomunicación específicamente diseñada para radiar o recibir ondas electromagnéticas. Estos sistemas de comunicaciones utilizan las antenas para realizar enlaces punto a punto, difundir señales de televisión o radio o para transmitir o recibir señales en equipos portátiles.

Se entiende por radiación al proceso mediante el cual la energía generada en un circuito eléctrico es transferida a una antena y emitida por ésta en forma de ondas electromagnéticas hacia el espacio. El circuito generador suele ser la etapa de amplificación final de un transmisor y el medio de acoplamiento entre éste y la antena, como puede ser una línea de transmisión o una guía de onda.

Por tanto las antenas son elementos pasivos cuyas características pueden considerarse bidireccionales, es decir, permiten la transición de una onda no guiada que se propaga en el espacio, a una onda guiada en una línea de transmisión conectada a un receptor. También cabe destacar que la onda guiada por la línea de transmisión será normalmente plana, mientras que la onda radiada por su parte será característica de las propiedades definidas por las ondas esféricas.

Cuando la antena es utilizada para radiar ondas electromagnéticas al espacio, cumple el papel de antena emisora o transmisora y cuando se emplea para interceptar o capturar ondas que se propagan en el espacio y convertirlas en energía útil, cumplirá la función de antena receptora.

En ambos casos se trata de un proceso de transferencia de energía que debe realizarse con la mayor eficiencia posible, del modo que se busque el mayor acoplamiento posible entre las impedancias de los elementos del sistema.

De no ser así, una parte importante de la energía recibida o transmitida será reflejada en la línea de transmisión dando lugar a ondas estacionarias que no contribuyen a la obtención de energía útil y que, además, son causa de dos consecuencias indeseables, distorsiones en la señal transportada y pérdidas por calentamiento en componentes propios del sistema.

4.2 Tipos de antenas en las comunicaciones inalámbricas

Las antenas, debido a las diferentes clasificaciones y características que pueden poseer, pueden clasificarse en diversos grupos. En este apartado vamos a citar los grupos más representativos tomando como referencia el alcance aportado al radio enlace y el área de cobertura de recepción o transmisión.

- **Antenas Direccionales:** Orientan la señal en una dirección determinada con un haz estrecho pero de largo alcance. Generalmente el haz y el alcance son inversamente proporcionales, a mayor apertura menos alcance y a menor apertura más alcance.

El alcance de una antena direccional viene determinado por una combinación de los dBi de ganancia de la antena, la potencia de emisión del punto de acceso emisor y la sensibilidad de recepción del punto de acceso receptor. Dentro de las antenas direccionales podemos distinguir varios tipos:

- a) **Parabólicas** (de disco o rejilla): Se utilizan para enlaces de alto alcance (pueden llegar a los 30 Km. de distancia).
- b) **Yagis:** Se utilizan para enlaces de medio alcance y no tienen complejidad de orientación.
- c) **Planares o de Panel:** Se utilizan para enlaces de corto alcance, pero son mucho más fáciles de orientar y además suelen ser pequeñas y de instalación sencilla. Serán las utilizadas en este proyecto (hablaremos de ellas más adelante).

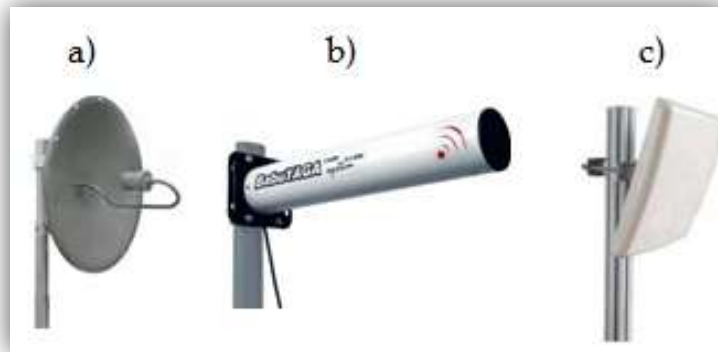


Figura 4.1: Tipos de Antenas Direccionales.

- **Antenas Omnidireccionales:** Orientan la señal en todas direcciones con un haz amplio pero de corto alcance. Transmiten la información en casi 360 grados y por tanto no requieren orientación. Otra desventaja es su corto alcance.



Figura 4.2: Antenas Omnidireccionales

- **Antenas Sectoriales:** Son mezcla de las antenas direccionales y las omnidireccionales. Las antenas sectoriales emiten un haz más amplio que una direccional pero no tan grande como el de una omnidireccional. De igual modo, su alcance es mayor que una omnidireccional y menor que una direccional. Para tener una cobertura de 360° y un largo alcance deberemos instalar tres antenas sectoriales de 120° ó 4 antenas sectoriales de 80° . Este sistema de 360° con sectoriales se denomina “Array”. La desventaja su alto coste con respecto a las anteriores.



Figura 4.3: Antenas Sectoriales

Como se ha comentado anteriormente el tipo utilizado es la de tipo “Panel” debido a que no necesitamos grandísimas prestaciones, son poco voluminosas y no requieren grandes requisitos para orientarlas teniendo un ángulo 30° tanto en polarización vertical como en horizontal, y lo más importante, su uso es sencillo, baratas y sencillas de fabricar.

4.3 Polarización

La polarización de una onda electromagnética es la orientación del vector del campo eléctrico. Teniendo en cuenta que a unas longitudes de onda del orden 10 a 20λ la onda electromagnética puede considerarse plana, en esta las componentes de los campos eléctricos y magnéticos son, en todo momento, perpendiculares entre sí y, a la vez, perpendiculares a la dirección de propagación. Es decir, “E” y “H” están en un plano perpendicular a la dirección de propagación y se dice por tanto que tal onda será transversal. Por lo tanto, la polarización en este ámbito se describe como el lugar geométrico trazado por el vector del campo eléctrico, “E”, en un plano estacionario, perpendicular a la dirección de propagación, cuando la onda atraviesa ese plano. El vector del campo en ese plano puede descomponerse en dos componentes ortogonales cuya amplitud puede ser variable en el tiempo y en el espacio. Si “E” estuviera en el plano “xy”, en la dirección “y”, la polarización será horizontal. Si el vector “E” está en el plano “yz”, siempre en la dirección “z”, la onda estará polarizada verticalmente.

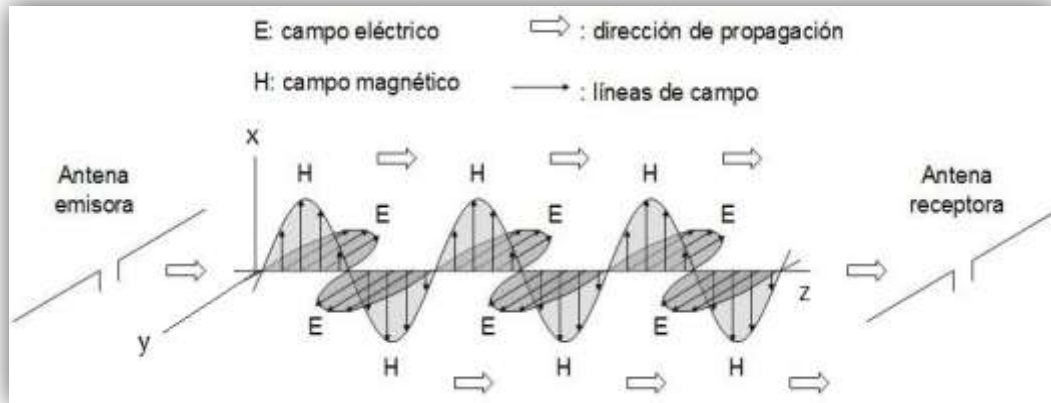


Figura 4.4: Polarización Horizontal

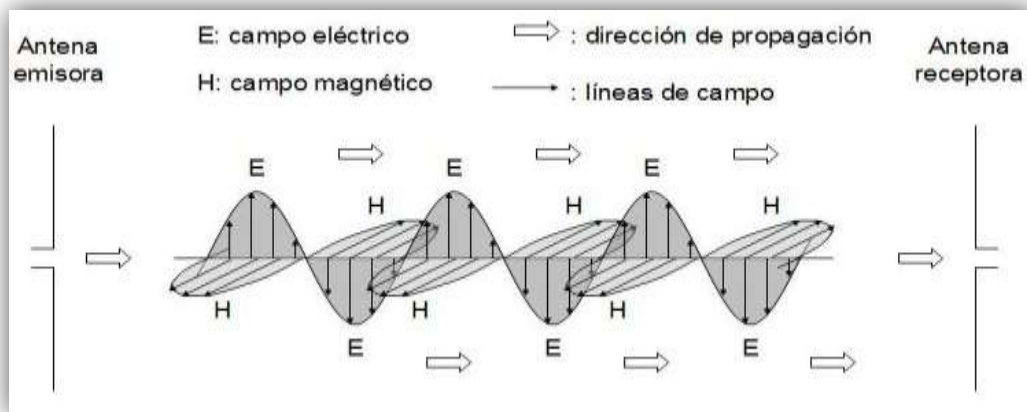


Figura 4.5: Polarización Vertical

4.4 Diagrama de radiación

El diagrama de radiación se define como la función matemática o representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena en el espacio representado por coordenadas. Cada antena tiene su propia forma de irradiar una señal. Hay antenas que irradian más en una dirección que en otra, hay otras que tienden a irradiar casi por igual en todas las direcciones y hay antenas que irradian solo en ciertas direcciones.

En términos generales, el diagrama de radiación de una antena es también su patrón de recepción. Prácticamente una antena, cuando emite, actúa como una lente concentrando la señal en ciertas direcciones mientras que cuando una antena es receptora, esta actúa como un embudo concentrando la señal solo en ciertas direcciones.

En la siguiente figura se muestra un típico diagrama de radiación con sus coordenadas en grados y ganancia en dB:

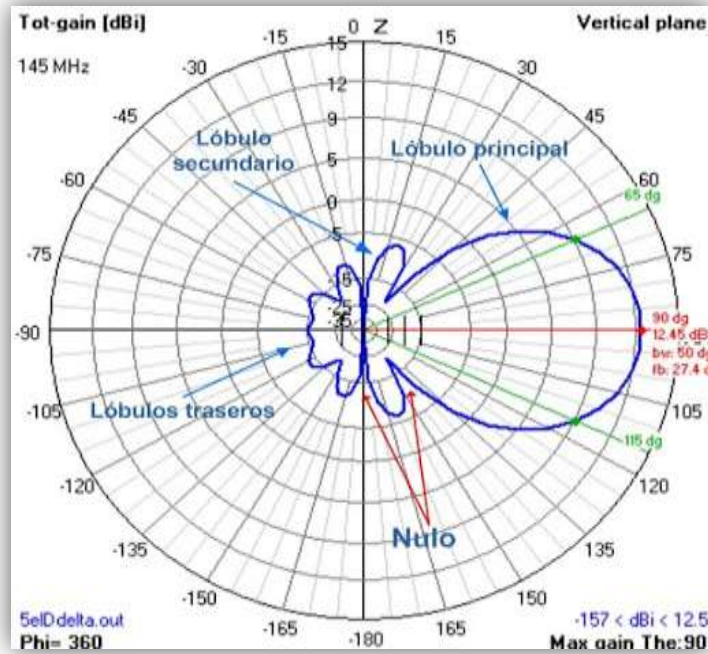


Figura 4.6: Diagrama de radiación

4.5 Lóbulos y ancho de haz

El diagrama de radiación se suele representar normalizados a su valor máximo de radiación y generalmente se pueden distinguir tres tipos de lóbulos: el lóbulo principal, que conlleva la dirección de máxima radiación, el lóbulo trasero, que se sitúa en sentido opuesto al lóbulo principal, y varios lóbulos laterales, de menor radiación que el principal. Todos estos lóbulos están separados por zonas donde no existe radiación. El ancho de haz se define por tanto como la separación angular entre dos puntos idénticos en el lado opuesto del patrón máximo, donde a medida que disminuye el ancho de haz, los lóbulos laterales aumentan y viceversa.

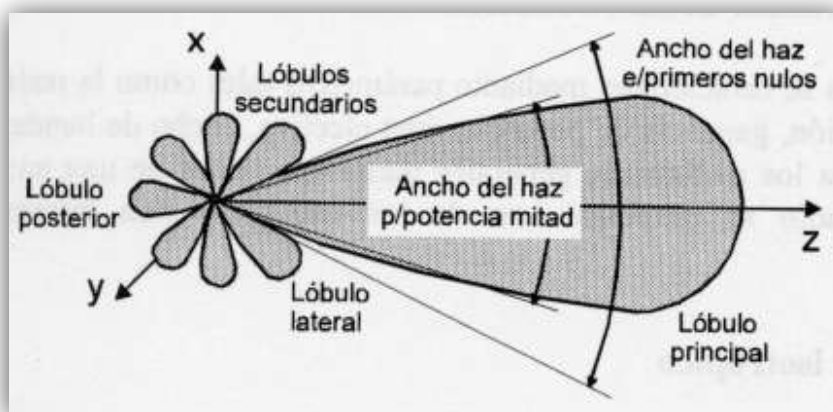


Figura 4.7: Tipos de lóbulos y Ancho de haz

4.6 Densidad de potencia radiada

Como ya hemos señalado las ondas electromagnéticas se utilizan para transportar información a través de un medio inalámbrico o una estructura de guía, de un punto a otro. Por lo que es intuitivo suponer que la potencia y la energía estén asociadas a los campos electromagnéticos. La densidad de potencia radiada se define como la potencia por unidad de superficie en una determinada dirección. Las unidades son vatios por metro cuadrado. Se puede calcular a partir de los valores eficaces de los campos tal que:

$$\vec{P}(\theta, \phi) = \text{Re}(\vec{E} \times \vec{H})$$

La relación entre el módulo del campo eléctrico y el módulo del campo magnético es la impedancia característica del medio. Por lo tanto, la densidad de potencia radiada también se puede calcular a partir de las dos componentes del campo eléctrico tal que:

$$\frac{|\vec{E}|}{|\vec{H}|} = \eta \quad \vec{P}(\theta, \phi) = \frac{E_{\theta}^2 + E_{\phi}^2}{\eta}$$

4.7 Directividad

La directividad de una antena se define como la relación entre la intensidad de la radiación en una dirección dada desde la antena y la intensidad de la radiación media en todas las direcciones. La intensidad radiación promedio es igual al total de potencia radiada por la antena dividida por 4π . Si la dirección no se especifica, la dirección de máxima intensidad de la radiación está implicada.

Por lo que, la directividad de una fuente no isotrópica es igual al ratio de su intensidad de radiación en una dirección dada respecto a la de una fuente isotrópica. En forma matemática, se puede escribir como:

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}}$$

Si la dirección no se especifica, implica que la dirección de la intensidad de radiación máxima (directividad máxima) se expresa de esta forma:

$$D_{max} = D_0 = \frac{U|_{max}}{U_0} = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}}$$

4.8 Eficiencia

La eficiencia de una antena puede definirse de 3 formas comunes. Una de ellas la define como la relación de la potencia radiada por una antena con respecto a la suma de la potencia radiada y la disipada. También puede definirse como la relación de la potencia radiada con respecto a la disipada. Y por último como la relación entre la potencia radiada por la antena con respecto a la potencia total de entrada.

La eficiencia de una antena se puede obtener a partir de las resistencias de radiación y óhmicas, teniendo en cuenta la relación entre la potencia total radiada y la potencia entregada a la antena, tal que:

$$\eta = \frac{W_t}{W_e} = \frac{W_t}{W_t + W_\Omega} = \frac{I^2 R_r}{I^2 (R_r + R_\Omega)} = \frac{R_r}{R_r + R_\Omega}$$

4.9 Ganancia

La ganancia de una antena es una medida de concentración de señal en una dirección específica. Una antena con alta ganancia es altamente direccional, mientras que una antena con baja ganancia es omnidireccional, y es medida generalmente en decibelios (dB).

Teóricamente la ganancia de una antena se define como la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección y la densidad de potencia que radiaría una antena isotrópica, a igualdad de distancias y potencias entregadas a la antena.

Recordando las relaciones de directividad anteriormente descritas, podemos definir que la intensidad de la radiación correspondiente a la potencia radiada es igual a la potencia de entrada por la antena dividida por 4π , tal que:

$$\text{Ganancia} = 4\pi \frac{\text{intensidad de radiacion}}{\text{potencia total de entrada}} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}}$$

Igualmente si no se especifica la dirección angular, se sobreentiende que la ganancia se refiere a la dirección de máxima radiación, y por lo tanto se calcularía de esta manera:

$$G = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{in}(\text{fuente isotropica sin perdidas})}$$

Aunque la ganancia de la antena está estrechamente relacionada con la directividad, es una medida que tiene en cuenta la eficiencia de la antena, así como sus capacidades de dirección.

Por tanto hay que destacar y diferenciar claramente las diferencias entre la directividad y la ganancia. En la definición de directividad se habla de potencia radiada por la antena, mientras que en la definición de ganancia se habla de potencia entregada a la antena. La diferencia entre ambas potencias es la

potencia disipada por la antena, debida a pérdidas óhmicas. Lo único que las relaciona es la eficiencia, y la relación entre ellas es la siguiente:

$$G(\theta, \phi) = D(\theta, \phi) \cdot \eta$$

Si una antena no tiene pérdidas óhmicas, entonces si podríamos hablar que la directividad y la ganancia son términos matemáticos exactamente iguales.

4.10 Regiones del campo

Cuando las corrientes dadas por la inducción de la onda TEM circulan por un conductor y las dimensiones son de orden comparable a la longitud de onda equivalente, (mayores que 0.1λ) la energía presente en el circuito puede radiarse y el circuito se convierte en una antena. Aunque la mayoría de las antenas son terminales de circuito abierto, se tiene un patrón de corriente por esos conductores.

Se destaca entonces dos regiones por donde la onda electromagnética podría radiar:

- **Campo cercano:** el cual se refiere al patrón de campo que está cerca de la antena. Sabiendo que “D” la longitud total de la antena y “r” la distancia desde el punto de radiación hasta un punto de medición arbitrario, se consideran las siguientes regiones de campo cercano:

- a) Campo cercano reactivo

$$r < 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$$

- b) Campo Cercano Radiado (Zona de Fresnel)

$$0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \leq r < \frac{2D^2}{\lambda}$$

- **Campo lejano (Zona de Fraunhofer):** el cual se refiere al patrón de campo que está a gran distancia de la antena.

$$r \geq \frac{2D^2}{\lambda}$$

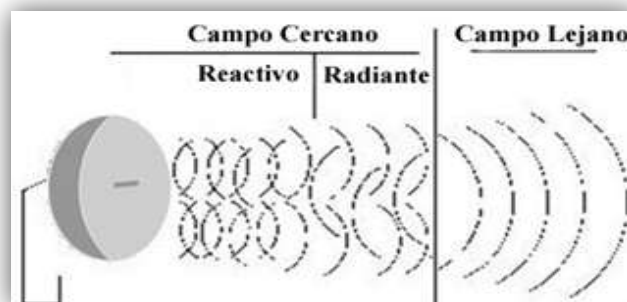


Figura 4.8: Regiones del campo

Durante la primera etapa, la potencia se irradia desde la antena, donde parte de la potencia se guarda temporalmente en el campo cercano. Durante la segunda mitad de esta misma etapa, la potencia que está en el campo cercano regresa a la antena, mientras que por otra parte toda la potencia que alcanza el campo lejano continuará irradiando en la dirección de propagación y nunca esta regresará a la antena.

4.11 Ancho de banda de trabajo

El ancho de banda es el margen frecuencial al que la antena está adaptada con una relación de onda estacionaria (ROE) menor a un valor prefijado. También se puede definir en términos de ganancia y se define como aquel margen de frecuencias en el que la ganancia de la antena no decae de un cierto valor respecto el máximo. Esta definición se suele utilizar en la caracterización de los amplificadores, y lo conocemos como el ancho de banda a “-3dB”.

El ancho de banda es un valor subjetivo, limitado por las características deseadas para el correcto funcionamiento de la antena y generalmente, están impuestas por el usuario. Por lo que podemos definir como ancho de banda al simple rango de frecuencias dentro del cual, con respecto a alguna característica deseable ya sea impedancia, polarización o ganancia, el desempeño de la antena se ajusta a un estándar especificado.

CAPÍTULO 5
MATERIAL Y CONCEPTOS
RELACIONADOS

5.1 Analizador de redes

El analizador utilizado en el proyecto es el Analizador de redes Rohde & Schwarz ZVL (9 KHz-6GHz), y es el mostrado en la siguiente figura:



Figura 5.1: Analizador Rohde & Schwarz ZVL (9 KHz-6Ghz)

Los analizadores de redes son equipos de elevado precio y gran complejidad que permiten la medida exhaustiva de componentes de radiofrecuencia. Existen dos tipos de analizadores de redes, los escalares y los vectoriales. Los primeros miden los parámetros de scattering únicamente en amplitud, mientras que los segundos permiten su medida en amplitud y fase. Estos últimos se llaman analizadores vectoriales y será el tipo de analizador que utilizaremos en el proyecto en cuestión.

Estos parámetros de scattering indican el nivel de transferencia de señal y adaptación de los puertos de cualquier componente. Independientemente al análisis de estos parámetros tiene otras funciones y características tales como:

- Medición de señales conocidas.
- Medición de componentes, dispositivos y circuitos.
- Medición de promedios de fase y amplitud (barridos de potencia y frecuencia).
- Corrección avanzada de errores.

5.1.1 Parámetros S

Son los parámetros de dispersión o scattering y miden los coeficientes de reflexión y transmisión entre la onda incidente y la reflejada. Estos parámetros describen completamente el comportamiento de un dispositivo bajo condiciones lineales en un determinado rango de frecuencia. Cada parámetro es caracterizado por magnitud, ganancias o pérdidas en decibelios y fase. A pesar de ser aplicables a cualquier frecuencia, los parámetros S son usados principalmente para redes que operan en radiofrecuencia o frecuencias de microondas.

Se pueden determinar los parámetros S a partir de mediciones de ondas incidentes y reflejadas en cada uno de los puertos de un cuadripolo lineal para unas condiciones determinadas: $a_2=0$ y $Z_L=Z_0$ y las condiciones inversas $a_1=0$ y $Z_L=Z_0$ como se describe en la siguiente figura:

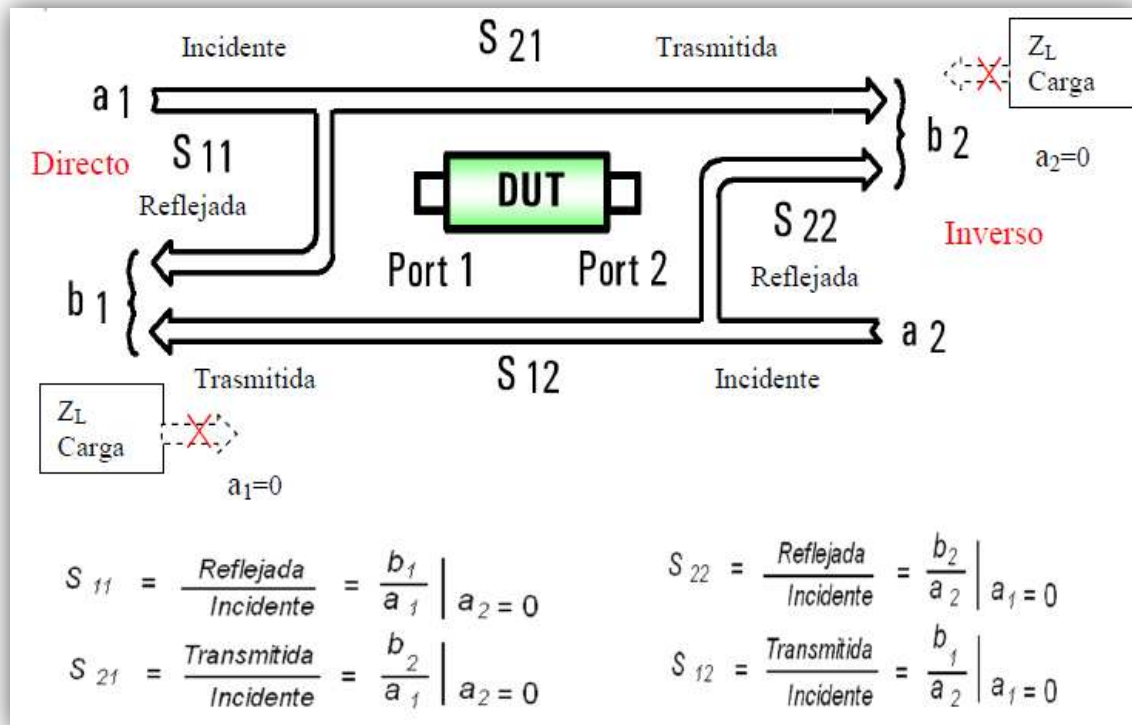


Figura 5.2: Representación de los parámetros S de un circuito

La descripción teórica de los parámetros es por tanto la siguiente:

- S_{11} : Coeficiente de reflexión a la entrada o coeficiente de reflexión directa. Nivel de señal que se refleja en el puerto 1 por desadaptación de impedancias cuando el puerto de salida está cargado con la impedancia característica de la línea.
- S_{21} : Coeficiente de transmisión directa o ganancia con la tensión directa. Transferencia de señal desde el puerto 1 hasta el puerto 2 cuando la salida se encuentra cargada.
- S_{22} : Coeficiente de reflexión a la salida o coeficiente de reflexión inversa. Nivel de señal que se refleja en el puerto 2 por desadaptación de impedancias cuando el puerto de entrada está cargado con la impedancia característica.
- S_{12} : Coeficiente de transmisión o ganancia con la tensión inversa. Transferencia de señal desde el puerto 2 hasta el puerto 1 cuando la entrada se encuentra cargada.

5.1.2 Parámetros S_{21} y S_{11}

Estos dos parámetros serán especialmente definitivos en nuestro proyecto, ya que con ellos podremos caracterizar tanto las pérdidas de inserción de todos los escenarios como la comprobación correcta del funcionamiento de cada antena, su banda de trabajo y la posterior identificación de uso en recepción o en transmisión.

En definitiva estos dos parámetros se definirán:

- Las pérdidas de inserción = $|S_{21}|$ dB
- Las pérdidas de retorno o reflexión = $|S_{11}|$ dB

Hablaremos de todo ello más adelante.

5.2 Kit de calibración

Dispondremos de un kit de calibración modelo Agilent 85033E 3.5 mm compatible con nuestro analizador de redes. Gracias a ello podremos medir correctamente el parámetro S_{11} de las antenas, lo cual se detallara en el siguiente capítulo.



Figura 5.3: Kit de calibración Agilent 85033E 3.5 mm

5.3 Antenas

Las antenas utilizadas en este proyecto son antenas tipo panel como ya hemos en el anterior capítulo. Estas antenas trabajan en las bandas de 2.4 GHz, 3.3 GHz y 5.4 GHz y por tanto son las adecuadas para el estudio que se quiere realizar en este proyecto ya que son las bandas en las que trabajan los sistemas WiFi y WiMAX.



Figura 5.4: Antenas de de 2.4 GHz, 3.3 GHz y 5.4 GHz

5.3.1 Antena de Panel de 2.4 GHz

Las especificaciones según el fabricante “TWIN ANTENNAS” son las siguientes:

- Banda de trabajo: 2400 MHz - 2500 MHz
- Polarización: Vertical y Horizontal
- Ancho de haz horizontal: 20°
- Ancho de haz vertical: 20°
- Ganancia: 18 dBi

Para información más detallada ver [Anexo 1]

5.3.2 Antena de Panel de 3.3 GHz

Las especificaciones según el fabricante “TWIN ANTENNAS” son las siguientes:

- Banda de trabajo: 3300 MHz – 3400 MHz
- Polarización: Vertical y Horizontal
- Ancho de haz horizontal: 20°
- Ancho de haz vertical: 20°
- Ganancia: 18 dBi

Para información más detallada ver [Anexo 2]

5.3.3 Antena de Panel de 5.5 GHz

Las especificaciones de este modelo de antena “hg5419P” según el fabricante “L- COM “ son las siguientes:

- Banda de trabajo: 5470 MHz - 5850 MHz
- Polarización: Vertical y Horizontal
- Ancho de haz horizontal: 16°
- Ancho de haz vertical: 16°
- Ganancia: 19 dBi

Para información más detallada ver [Anexo 3]

5.4 Soportes y trípodes

Se necesitarán trípodes para la sujeción de las antenas y orientación de las mismas. En estos trípodes se fijará una vara para sujetar la antena al trípode y poder dar orientación o altura deseada a la misma.



Figura 5.5: Tipos de trípodes y soportes

5.5 Cables

Se necesitará un cableado para conectar las antenas a los puertos del analizador. Estos cables serán latiguillos con conectores SMA fabricados en la UAM. Estos proporcionaran pérdidas adicionales; igualmente hablaremos sobre ello más adelante, así como también de la necesidad de calibración.



Figura 5.6: Latiguillos con conector SMA

5.6 Medidor laser

El modelo del medidor laser es el Bosch DLE40. Sera utilizarlo para obtener una mayor precisión y exactitud en la medida de la altura o distancia entre las antenas y para poder alinear las mismas en el radioenlace. Para información más detallada ver [Anexo 4]



Figura 5.7: Medidor laser Bosch DLE40

5.7 Nivel

El nivel utilizado es el “Smart Tool Builder's Angle Sensor Module with Carrying Case” modelo 93969 del fabricante M-D Buildg Products. Este será necesario para alinear las antenas de tal manera que no estén inclinadas indebidamente y la dirección de polarización no se vea afectada en la medida.

Para información más detallada ver [Anexo 5]



Figura 5.8: M-D SmartTool Builder's Angle Sensor Module

5.8 Otras herramientas

Como son una cinta métrica, un destornillador o una llave inglesa, que serán de apoyo para una mejor medición de distancias y alturas o para la calibración, cambio de escenarios y conservación de especificaciones del escenario.

CAPÍTULO 6

METODOLOGÍA Y

TIPOS DE ESCENARIOS

6.1 Banda útil e identificación de antenas

Es importante realizar una comprobación de la banda de trabajo en la que operan las antenas en cuestión, ya que a veces el fabricante ofrece especificaciones las cuales en la práctica pueden llegar a no ser ideales o fiables. También estos datos pueden ir variando con el tiempo o por el uso de estas, por ello es importante analizar en qué estado se encuentran para realizar una buena caracterización de las medidas.

Como hemos mencionado anteriormente, el parámetro de reflexión S_{11} será imprescindible para imponer el ancho de banda que se utilizará en la práctica. Como se especificó en el capítulo cuatro, el ancho de banda es el margen frecuencial al que la antena está adaptada con una relación de onda estacionaria (ROE) menor a un valor prefijado y este valor será impuesto por el usuario acorde a una serie de características deseadas. En nuestro caso se ha establecido que sea inferior a -10 dB. Un ejemplo del procedimiento es el siguiente:



Figura 6.1: Procedimiento de elección de banda útil

Igualmente, al ser antenas estándar donde no se especifica en ningún caso si deben ser utilizadas como receptoras o transmisoras en un enlace radioeléctrico, el parámetro S_{11} también nos podrá indicar cuál de las antenas podría ser mejor para transmitir o cuál podría ser mejor para recibir la señal, y esto dependerá del nivel de reflexión que poseen. Es decir, si la antena 1 muestra una reflexión más baja en la frecuencia central que la antena 2, se utilizará como transmisora la antena 1, y por lo tanto, la antena 2, que tiene reflexión más alta, como receptora.

Para poder caracterizar todo esto deberemos realizar dos pasos previos:

1) Puesta a punto del analizador de redes:

- Encendemos el analizador sin ningún tipo de conexión en los puertos.
- Pulsamos el botón “TRACE”, luego “Add Trace” y creamos 4 trazas, cada una de ellas nombradas como S_{11} , S_{21} , S_{12} y S_{22} . De esta manera podremos observar los diferentes parámetros S del enlace. Con el botón “FORMAT” indicaremos que estos parámetros se midan en la unidad deseada, en este caso, “dB”.
- Con el botón “CENTER” imponemos la frecuencia central y con el botón “SPAN” el ancho de banda de trabajo. Otra forma de señalar la banda es pulsando “START” y “STOP” que serán la frecuencia de inicio y final de la banda respectivamente, donde la frecuencia central se ajustara automáticamente.
- Con el botón “SWEEP” indicaremos el número de pasos o muestras que queremos en el barrido frecuencial.
- Por último con el botón “POWER” indicamos el valor máximo de potencia permitido por el analizador. Este máximo será en todos los casos 20 dBm.

2) Calibramos el analizador de redes con el kit de calibración:

- Para proceder a este tipo de calibración pulsamos el botón “MEAS”, luego “S-Param” y por último “WIZARD”.
- Aparecerá un menú donde deberemos seleccionar el tipo de conector y el modelo del kit de calibración, en nuestro caso se seleccionaran de “conector”: **pc 3.5 (m-f)** y de “Kit”: **85033d-e**
- Una vez seleccionados procedemos a las conexiones OPEN, SHORT, MATCH (LOAD) de cada uno de los puertos, y la conexión THROUGH. En el kit tenemos disponibles las diferentes conexiones que se deben hacer al cable SMA para calibrar, salvo para "THROUGH" donde es necesario conectar los dos extremos del cable con un adaptador de SMA hembra a hembra que también se incluye en el kit.



Figura 6.2: Procedimiento de calibración con el kit

6.1.1 Resultados

Siguiendo estos pasos anteriormente descritos, el parámetro S_{11} estaría ya “normalizado a 0” y el analizador ya estaría listo para obtener una medida correcta del parámetro S_{11} de cada antena. Para certificar la calibración correcta en el analizador deberemos observar algo semejante a la siguiente imagen:

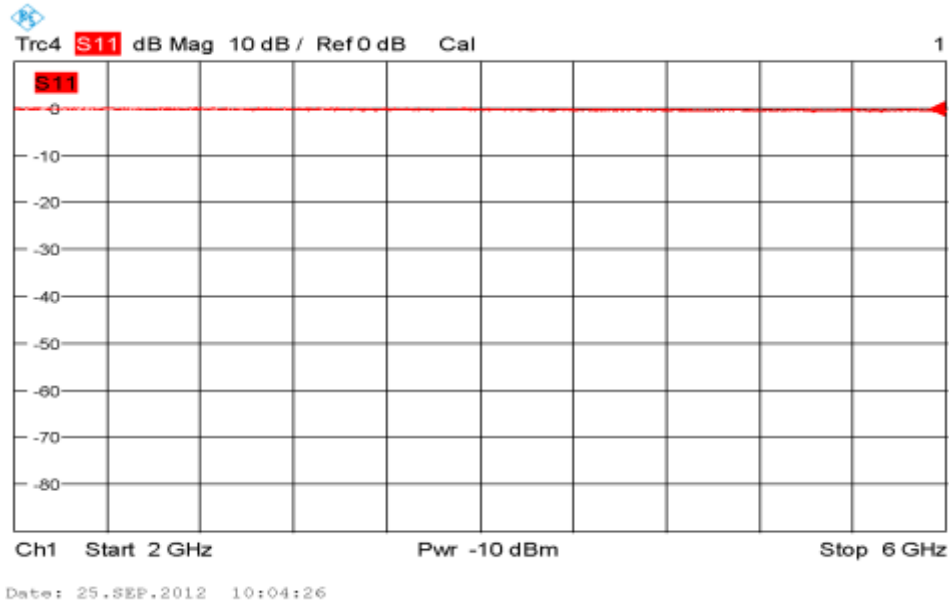


Figura 6.3: Parámetro S_{11} “Normalizado a 0” con el Kit de Calibración

Una vez realizado esto, conectando las antenas al analizador observamos los siguientes parámetros S_{11} de cada una de las antenas:

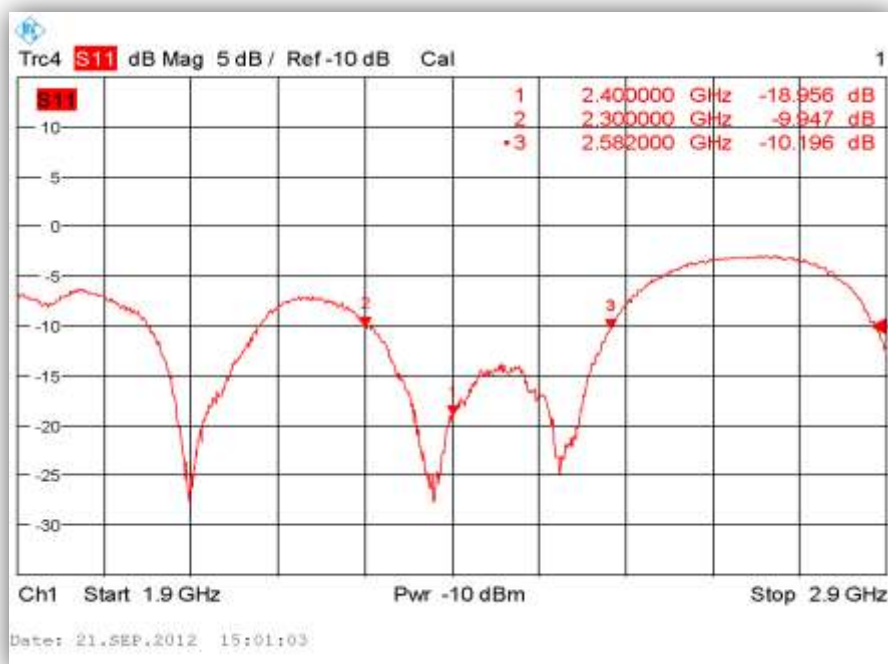


Figura 6.4: Parámetro S_{11} de la Antena 1 de 2.4 GHz

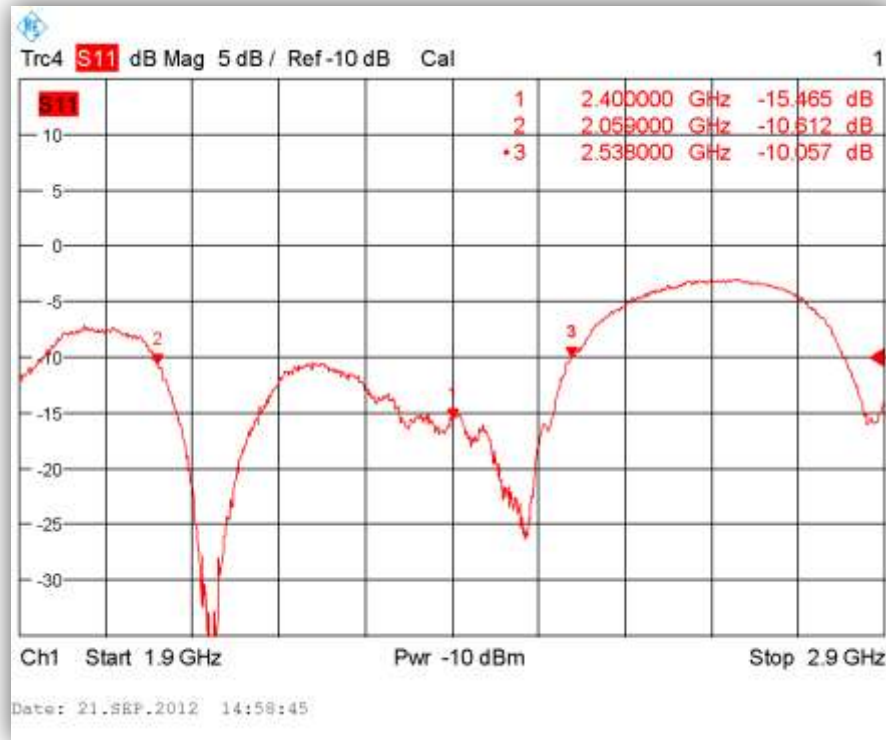


Figura 6.5: Parámetro S_{11} de la Antena 2 de 2.4 GHz

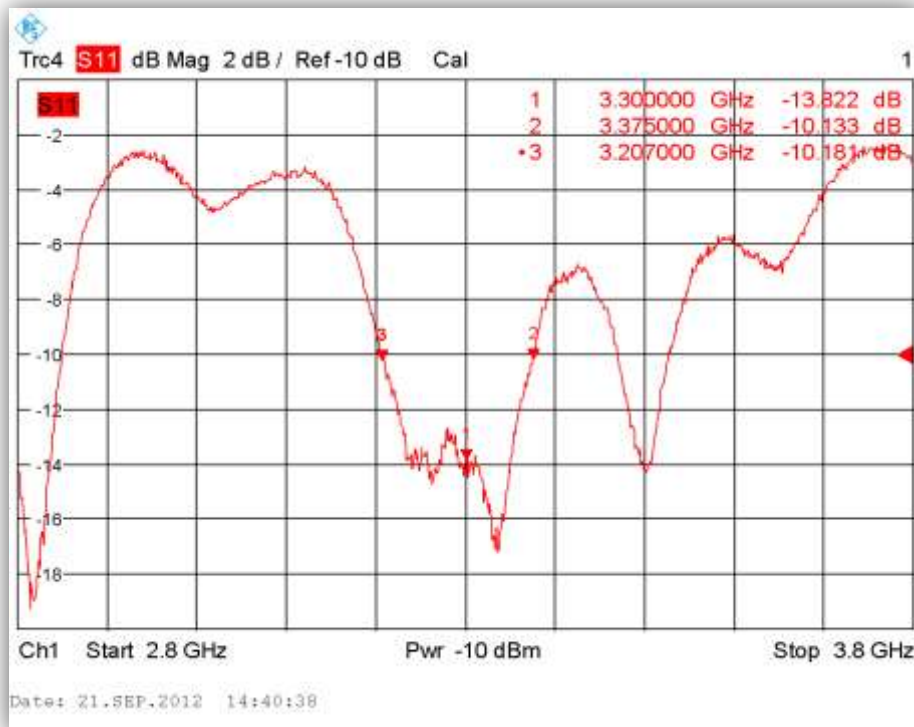


Figura 6.6: Parámetro S_{11} de la Antena 1 de 3.3 GHz

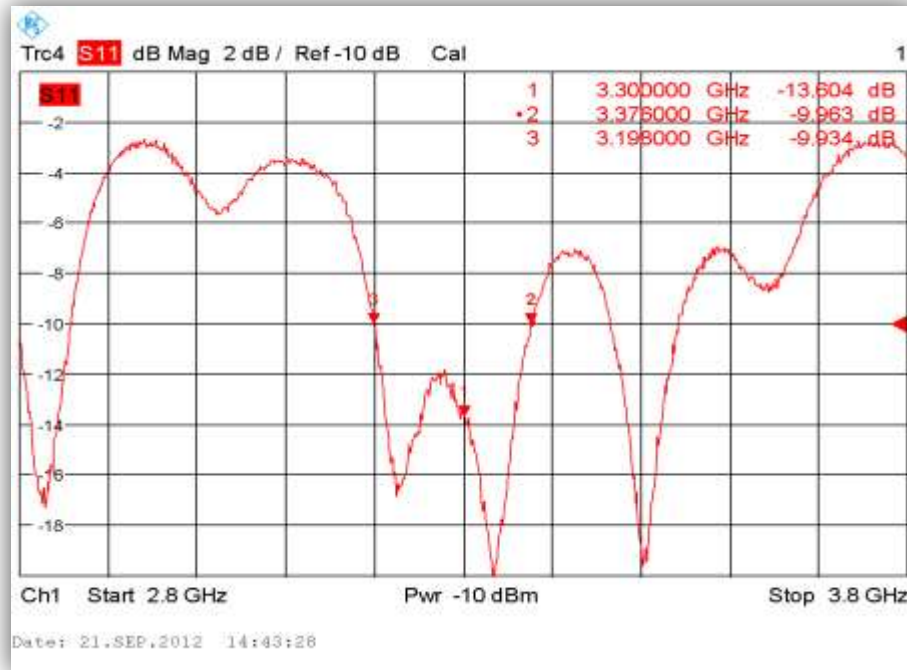


Figura 6.7: Parámetro S_{11} de la Antena 2 de 3.3 GHz



Figura 6.8: Parámetro S_{11} de la Antena 1 de 5.5 GHz

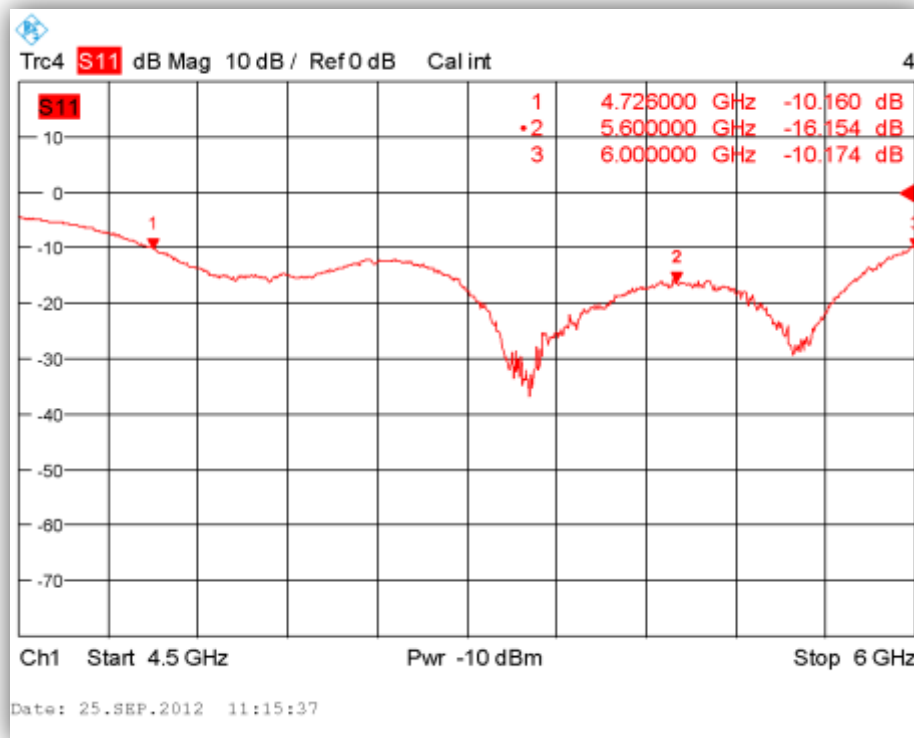


Figura 6.9: Parámetro S_{11} de la Antena 1 de 5.5 GHz

6.1.2 Conclusiones

Para las antenas de 2.4 GHz, analizando los dos parámetros S_{11} , determinamos que:

- ✓ $f_c = 2.41$ GHz (frecuencia central).
- ✓ $BW = 230$ MHz (Ancho de banda).
- ✓ Banda de trabajo útil = (2.30 - 2.53) GHz
- ✓ La Antena 1 será utilizada como receptora y la antena 2 como transmisora.

Para las antenas de 3.3 GHz, analizando los dos parámetros S_{11} , determinamos que:

- ✓ $f_c = 3.29$ GHz (frecuencia central).
- ✓ $BW = 160$ MHz (Ancho de banda).
- ✓ Banda de trabajo útil = (3.21 - 3.37) GHz
- ✓ La Antena 1 será utilizada como receptora y la antena 2 como transmisora.

Para las antenas de 5.5 GHz, analizando los dos parámetros S_{11} , determinamos que:

- ✓ $f_c = 5.37$ GHz (frecuencia central).
- ✓ $BW = 1270$ MHz (Ancho de banda).
- ✓ Banda de trabajo útil = (4.73 - 6) GHz
- ✓ La Antena 2 será utilizada como receptora y la antena 1 como transmisora.

6.1.3 Bandas, canales y número de puntos

El propósito de este proyecto es observar toda la banda de trabajo, es decir nos interesa analizar las pérdidas de inserción que se producen en toda la banda útil que tienen nuestras antenas. Pero en algunos casos, dependiendo de lo grande que sea el ancho de banda, nos interesará observar y caracterizar determinados trozos de la banda, para analizar más detenidamente y con más precisión los efectos que ocurren con un paso pequeño de frecuencias.

Cuando queramos analizar estos diferentes canales, se deberán elegir de diferentes tipos de tamaños, siempre siguiendo la siguiente regla:

- $f_2 - f_1 \rightarrow$ Banda útil
- $f_2 - f_1 / 2 \rightarrow$ Mitad de la banda
- $f_2 - f_1 / 4 \rightarrow$ Un cuarto de la banda

Y así sucesivamente, dividiendo la banda en múltiplos de 2. Se dejara de dividir la banda hasta que esta sea muy pequeña y por lo tanto no se aprecie ningún tipo de característica que haya que tenerse en cuenta en la observación de la medida.

Por otro lado, señalar que el número de puntos elegido deberá ser más grande cuando tengamos canales de pequeño ancho de banda. Cuando representamos un ancho de banda muy grande no será una condición estricta, y por lo tanto no será necesaria.

6.2 Procedimiento en la medida en escenarios

En este apartado destacaremos una serie de normas que se deben de tener en cuenta a la hora de realizar y capturar las medidas que se pretenden en este proyecto.

6.2.1 Posición de las antenas receptora y transmisora con respecto al obstáculo

La antena transmisora debe establecerse como estación base estática situando en el analizador de redes detrás de la misma. La otra antena será la receptora y se colocará a una cierta distancia de la transmisora, donde el obstáculo en cuestión, se interpondrá en medio del enlace guardando la misma distancia entre las dos antenas. Normalmente estos enlaces serán cortos y deberán ser colocadas las antenas de tal manera que se puedan conectar ambas al analizador de redes mediante los cables SMA. Este tipo de medidas se realizarán en todo caso en la región del “campo lejano”, de tal manera que aunque sean cortos los enlaces, sean estos lo suficientemente largos para evitar el campo cercano.

La razón por la que son cortos estos enlaces se debe al tipo de medida que se pretende en este proyecto. No son medidas referidas a enlaces de propagación a largas distancias, sino que se pretende exclusivamente observar el efecto que crea el obstáculo en la señal, intentando ignorar, en la medida de lo posible, todo tipo de pérdidas o factores que pueden falsear la pérdida de inserción propia del objeto o material. Así mismo las antenas deben estar perfectamente alineadas, así como también el obstáculo o el punto del obstáculo que se desea medir o caracterizar. De esta manera podremos medir las pérdidas de inserción con la máxima ganancia, la cual se encuentra en el lóbulo principal, tal y como muestra el diagrama de radiación de cada una de las antenas.

6.2.2 Calibración en un escenario

De la misma manera que para observar el parámetro de reflexión S_{11} hemos procedido a calibrar el analizador con el kit de calibración estableciendo inicialmente el parámetro S_{11} normalizado a 0, también será necesaria la calibración cuando se proceda a la medida del escenario. En este caso será necesario otro tipo de calibración, donde el objetivo es normalizar a 0 el parámetro S_{21} (pérdidas de inserción) justo antes de insertar el obstáculo a medir, donde la idea es suprimir todos los efectos externos que no son propios del obstáculo, y que por lo tanto podrían falsear la medida del objeto o material objetivo.

Para ello primeramente se procederá a la colocación de las antenas de la misma forma en la que queramos medir el escenario, pero esta vez sin el obstáculo en medio del enlace, es decir imponer una “zona de calibración”. Para ello se debe conservar la altura de las antenas, posición, alineación o incluso la polarización que queramos utilizar cuando estemos en el escenario. También, esta zona de calibración, debe ser semejante al “escenario real” donde ocurrirá la medición, de tal manera que las estructuras o paredes alrededor de la zona u otros tipos de factores u objetos que formen parte del escenario y falseen la medición, sean partícipes de la calibración. Una vez realizado correctamente lo indicado es cuando deberemos calibrar. Este tipo de calibración, por tanto, podrá ignorar las pérdidas que influye el escenario o zona de medición e inclusive las pérdidas que podrían ocasionar los cables SMA del radioenlace. La calibración, la cual cumple similitudes con la anterior del “Kit de Calibración”, se realiza de la forma siguiente:

- Se conecta el puerto 1 a la antena transmisora y el puerto 2 a la antena receptora.
- Se incluyen las 4 trazas con el botón “TRACE” y “Add Trace” y definimos, como antes, los parámetros S_{11} , S_{21} , S_{12} y S_{22} . En este caso nos interesará solo el parámetro S_{21} , por lo que eliminaremos los demás y dejaremos activa la traza S_{21} . Con el botón “FORMAT” indicaremos que el parámetro se mida en dB.
- Igualmente con el botón “CENTER” imponemos la frecuencia central y con el botón “SPAN” el ancho de banda de trabajo.
- Con el botón “SWEEP” indicaremos el número de pasos o muestras que queremos en el barrido frecuencial.
- Con el botón “POWER” indicamos el valor máximo de potencia permitido por el analizador, de 20 dBm.
- Una vez realizado estos pasos previos pulsamos “CAL”, “Start Cal”, “Two Ports P1 P2”, y “Forward Cal normalize” y finalizará la calibración.
- Finalmente el parámetro S_{21} estará normalizado a 0, y el obstáculo estaría listo para su medición.

6.2.3 Medida y captura de datos

Una vez normalizado 0 el valor S_{21} en la “zona de calibración”, se trasladará el enlace al escenario objetivo, donde estará el obstáculo deseado para la medición. Algunas veces no será tan sencillo calibrar, ya que muchos de los escenarios medidos son fijos y por tanto será complicado conservar las mismas condiciones que el escenario real. Por tanto, se debe tener extremo cuidado en utilizar las mismas alturas, distancias, posiciones, y orientaciones con respecto a la zona de calibración.

En el caso de que sea imposible, se deberá calibrar tomando otro escenario muy cercano al objetivo que contenga casi los mismos factores que afectan a la medida para que la medición sea lo más ideal posible.

Teniendo en cuenta esto, cuando se realice la medida del obstáculo deberemos capturar los datos ofrecidos por el analizador, pulsando “TRACE”, “IMPORT” y “EXPORT DATA”.

Se muestra a continuación una captura de pantalla del analizador como ejemplo aclarativo:

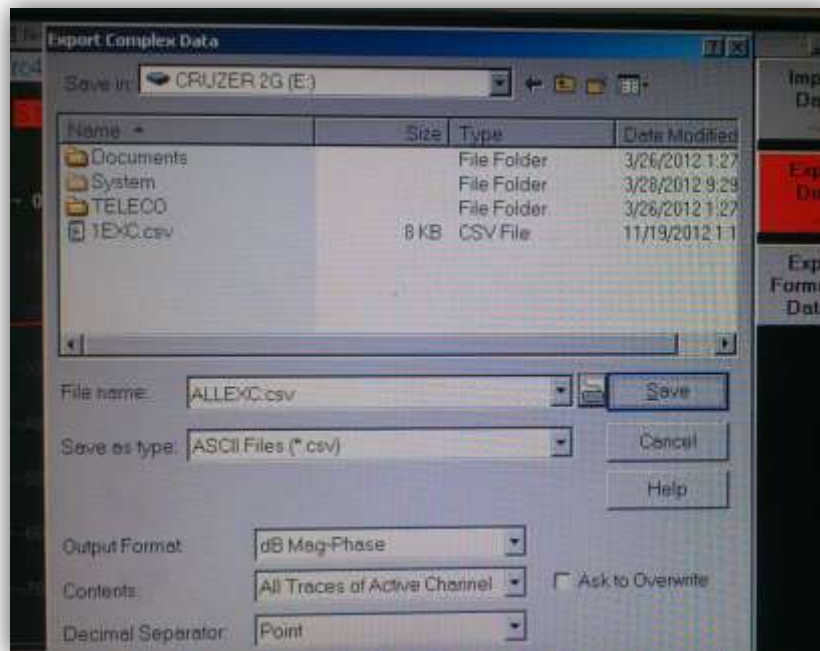


Figura 6.10: Captura de datos en el analizador

En este caso se ha decidido guardar la magnitud y la fase del parámetro S_{21} en formato Excel. Una vez disponemos de esta hoja de datos guardada en un pendrive, los valores de frecuencias y sus correspondientes valores de los parámetros S_{21} los procesaremos con diversos programas de Matlab, para poder representarlos de una manera más idónea y visual, con la que poder sacar diversas conclusiones sobre cada tipo de escenario. Estos Scripts serán necesarios no solo para la representación sino también para eliminar los comentarios y las columnas sobrantes que se genera en el archivo del analizador, quedándonos simplemente con un archivo de 3 columnas que serán las referidas a la frecuencia, amplitud y fase de las medidas.

6.3 Tipos de escenarios, cobertura y obstáculos a analizar

En este proyecto se pretende informar de las pérdidas de inserción ocasionadas en obstáculos que se pueden dar en una propagación o cobertura al transmitir señales radio-magnéticas con alguna tecnología inalámbrica, ya sea WiFi o WiMAX. Por tanto es importante realizar una selección previa de todos los escenarios posibles a analizar y tomar decisiones en la elección de escenarios.

Hemos elegido varios tipos de escenarios donde se cree que puede haber más impacto e interés en su caracterización, ya sea por ser comunes o muy típicos en cualquier tipo de enlace, o porque se disponga escasa información o documentación sobre este tema a tratar y sea, por tanto, necesario ampliar la información existente.

En cualquier tipo de enlace de transmisión podemos diferenciar dos tipos de zonas claramente distinguibles, Indoor y Outdoor.

Los entornos “Indoor” pueden referirse, entre otros, a oficinas, hoteles, centros comerciales, aeropuertos, estructuras subterráneas. Son los más complicados debido a la atenuación que producen un gran número de obstáculos (paredes, pisos, columnas, etc.) dificultando así la propagación de la señal. Estas pérdidas por atenuación varían enormemente dependiendo del tipo de material del edificio y del tipo de estructura, que son factores a tener en cuenta en el análisis de cobertura. Se debe garantizar por tanto una cobertura mínima en la posición más lejana o rebuscada de la estación base.

Por todo ello será necesario realizar análisis de estos obstáculos en este tipo de entornos. La red que se suele emplear exclusivamente en estas zonas es la red WLAN con tecnologías como WiFi o HomeRF, que como hemos dicho en anteriores apartados, disponemos de antenas que trabajan en este tipo de frecuencias

Por otro lado, los entornos “Outdoor” son escenarios en el exterior y pueden aludir a ciudades, pueblos de montaña o urbanizaciones. En estas ubicaciones es importante conocer el tipo de terreno ya que normalmente es irregular, el contorno de la zona o la presencia de obstáculos (montañas, edificios, árboles...), determinantes a la hora de analizar la cobertura.

En este proyecto no se pretende analizar la propagación o la cobertura que se podría llegar a dar en un entorno urbano, sino que, lo interesante es observar los obstáculos que se pueden encontrar en el enlace como vallas, arbustos, y sobretodo arboles. Una de las tecnologías que se emplean para este tipo de entornos es el WIMAX. Igualmente disponemos de antenas que trabajan para este tipo de frecuencias.

CAPÍTULO 7

CAMPAÑA DE MEDIDAS

7.1 Escenario 1: Cristal doble con cámara de aire

El primer escenario que vamos a caracterizar es un cristal doble con cámara de aire, correspondiente al hall de la entrada principal del “Edificio C” de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Autónoma de Madrid.

7.1.1 Estructura, dimensiones y puntos de análisis



Figura 7.1.1 y 7.1.2: Diferentes vistas del cristal doble con cámara de aire

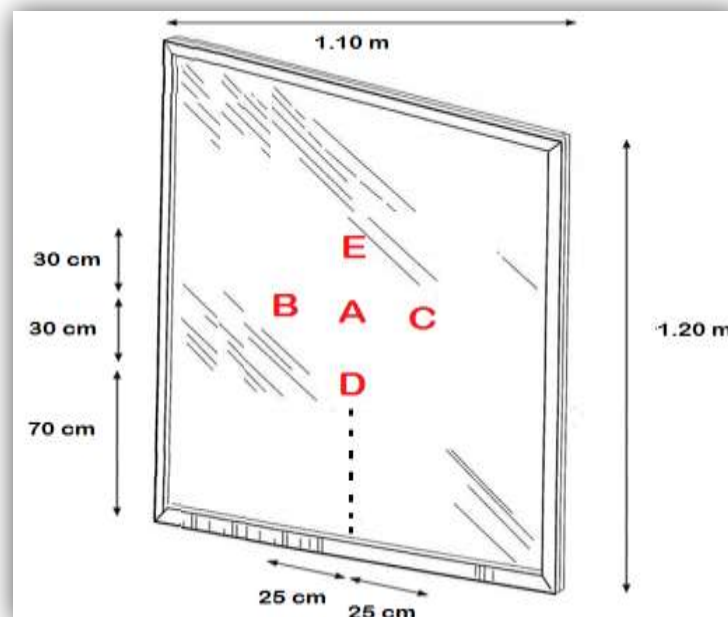


Figura 7.1.3: Dimensiones y puntos de análisis del escenario

7.1.2 Teoría aplicada: Modelización de la estructura

El primer escenario, como hemos comentado, es una puerta de cristal con marco metálico, el cual está compuesto por dos cristales, donde se encuentra una cámara de aire entre los dos, que actúa de aislante térmico y sonoro. Las dimensiones son (2+8+3) mm, donde 2mm tiene el grosor de un cristal, 3mm el otro, y 8mm la cámara de aire.

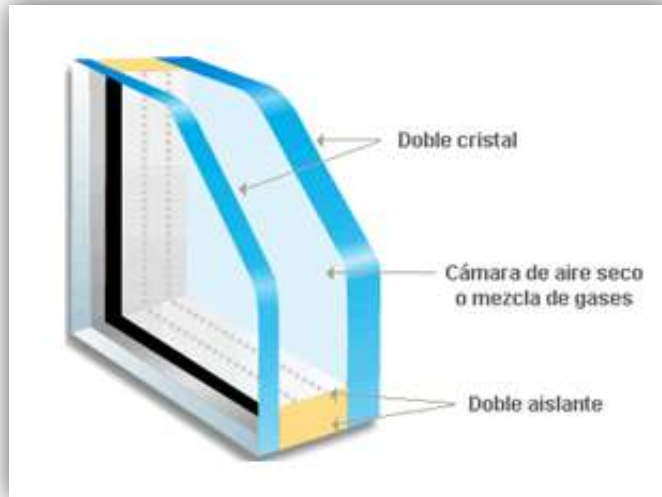


Figura 7.1.4: Estructura del escenario

En este escenario se van a producir muchos efectos que podrían falsear la medida, donde vamos a destacar tres de ellos, los cuales hay que tener muy en cuenta en el análisis:

- **Refracción:** al realizar las medidas en los diferentes puntos anteriormente descritos, las diferentes ondas se van a ver refractadas, es decir, van a cambiar de dirección, de tal manera que una de las pérdidas de inserción a tener en cuenta será por este fenómeno, donde la antena receptora recibirá las ondas en diferentes direcciones con respecto a las de transmisión:

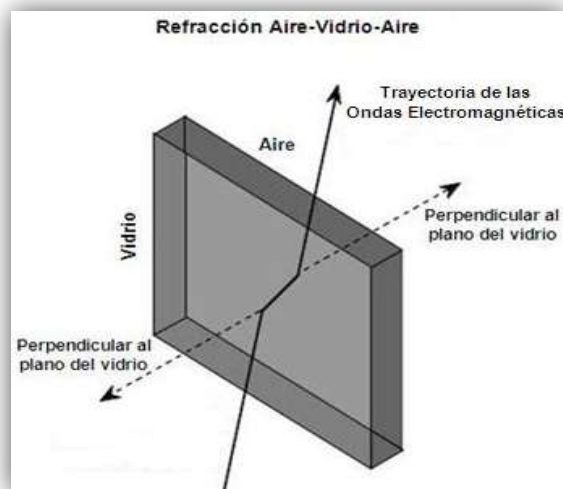


Figura 7.1.5: Refracción del cristal

- **Reflexión:** Otro tipo de característica del cristal a tener en cuenta es la reflexión. Esta característica afectará a las ondas emitidas donde al chocar con el cristal, parte de la señal será devuelta con un Angulo de reflexión determinado. Por ello al realizar la caracterización del escenario se ha tenido muy en cuenta la distancia de la antena transmisora con respecto al cristal, para que no se produzcan falseos en las medidas y no se produzcan interferencias entre las ondas emitidas y las reflejadas.



Figura 7.1.6: Reflexión del cristal

- **Cámara de aire:** Al tener doble cristal con cámara entre ellos, las ondas van a ser afectadas por una doble reflexión y una doble reflexión, es decir, los dos fenómenos anteriormente descritos van afectar a la dirección de las ondas por partida doble, lo que supone más pérdidas de inserción.

7.1.3 Resultados y análisis del escenario

- A continuación vamos exponer las pérdidas de inserción que hemos obtenido para los diferentes puntos: A, B, C, D, E en los tres tipos de bandas de frecuencias utilizadas y para los dos tipos de polarización H y V que poseen nuestras antenas.

A partir de todos estos datos, hemos representado en diferentes tipos de graficas las pérdidas de inserción obtenidas. En primer lugar vamos exponer las medidas individuales para cada punto de análisis y para cada una de las frecuencias, donde superpondremos la polarización horizontal y la polarización vertical. Las graficas son las siguientes:

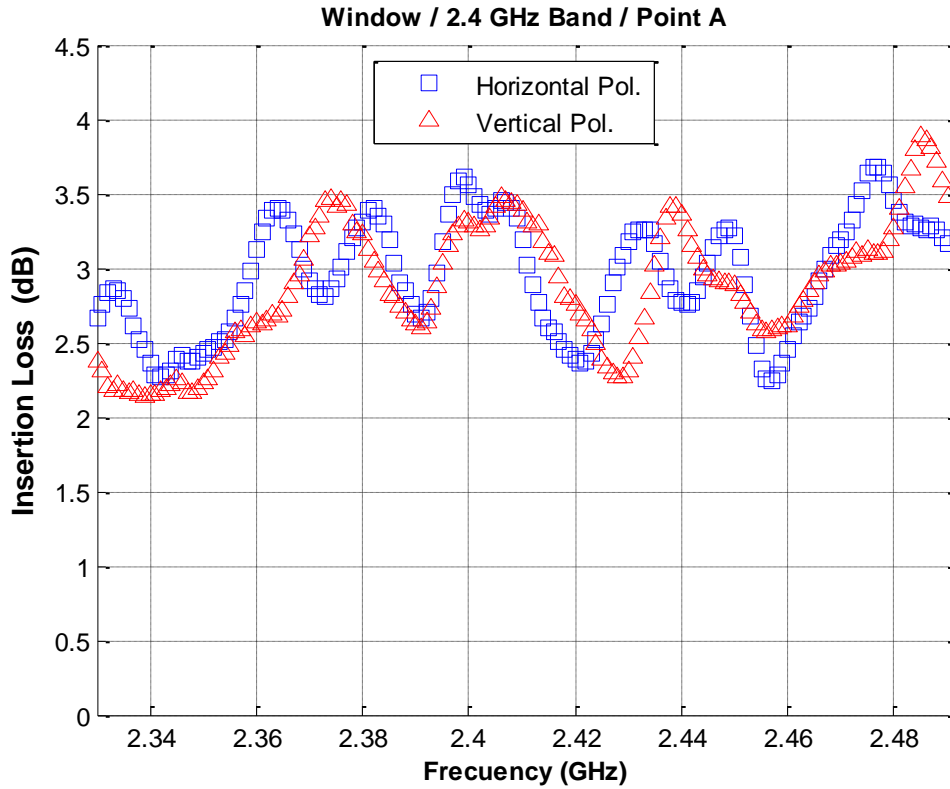


Figura 7.1.7: Medida en el “Punto A” a 2.4 GHz

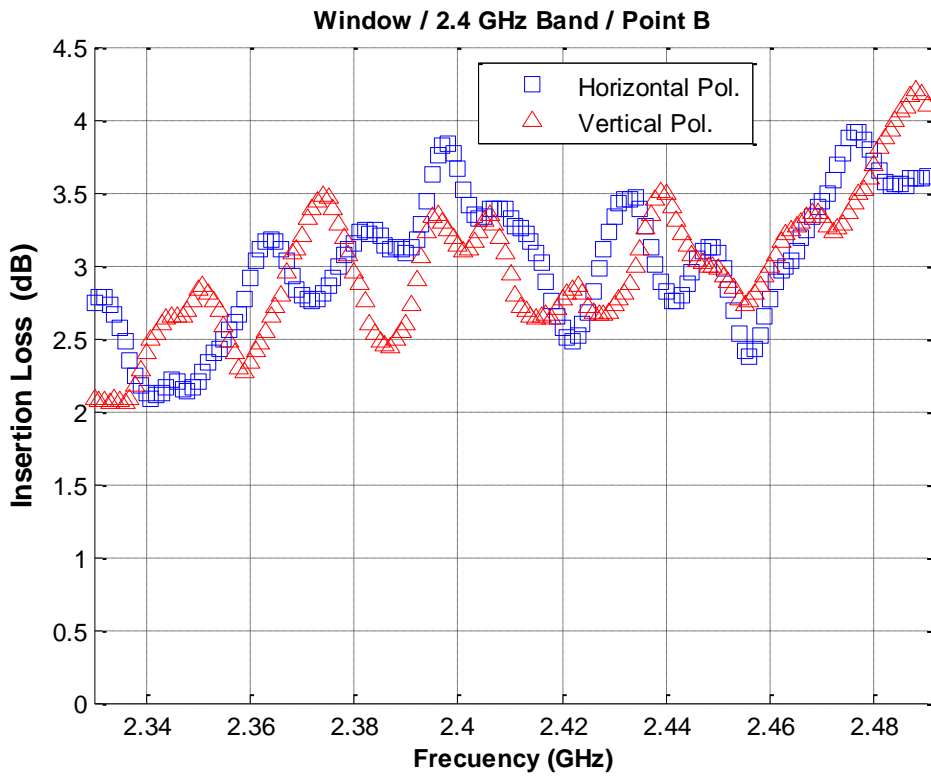


Figura 7.1.8: Medida en el “Punto B” a 2.4 GHz

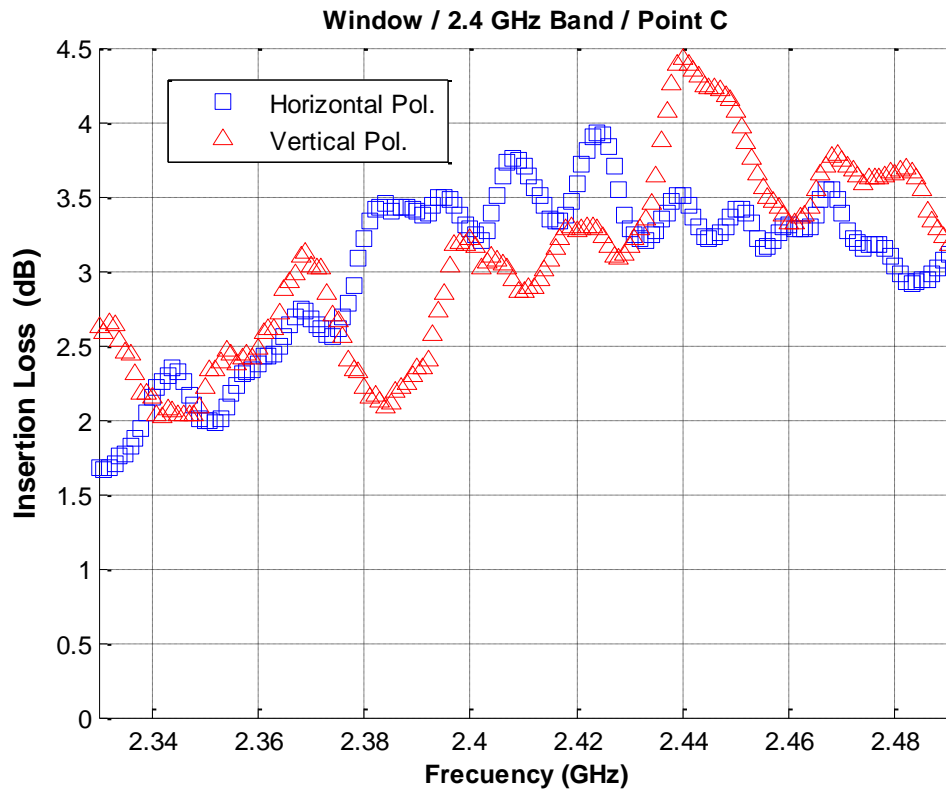


Figura 7.1.9: Medida en el "Punto C" a 2.4 GHz

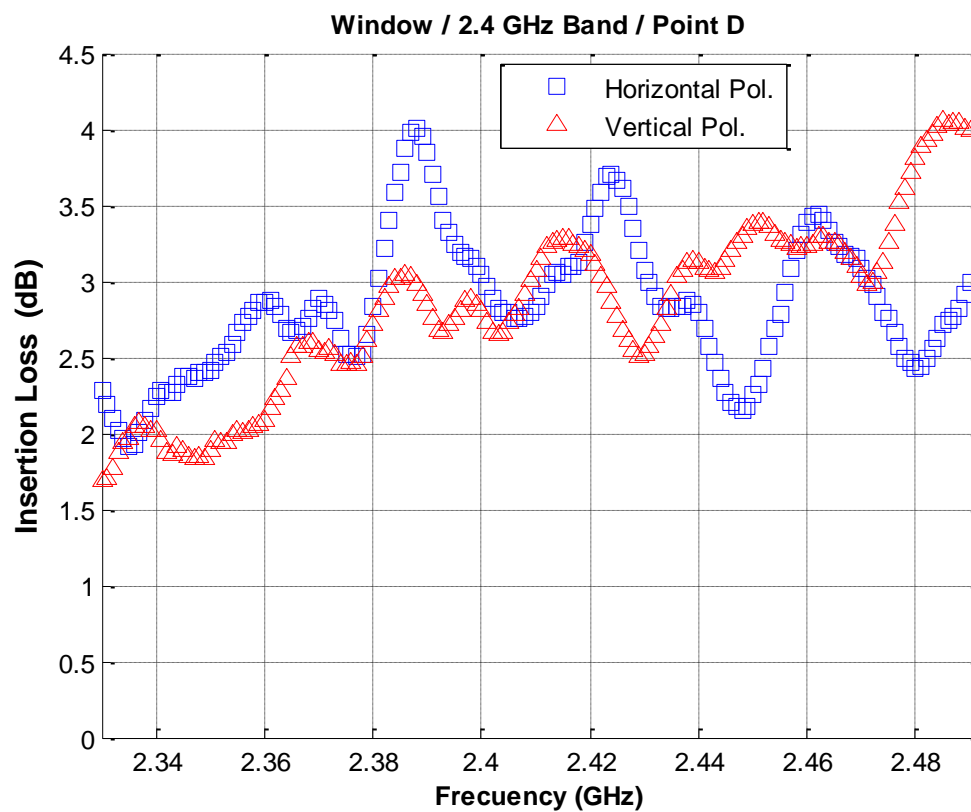


Figura 7.1.10: Medida en el "Punto D" a 2.4 GHz

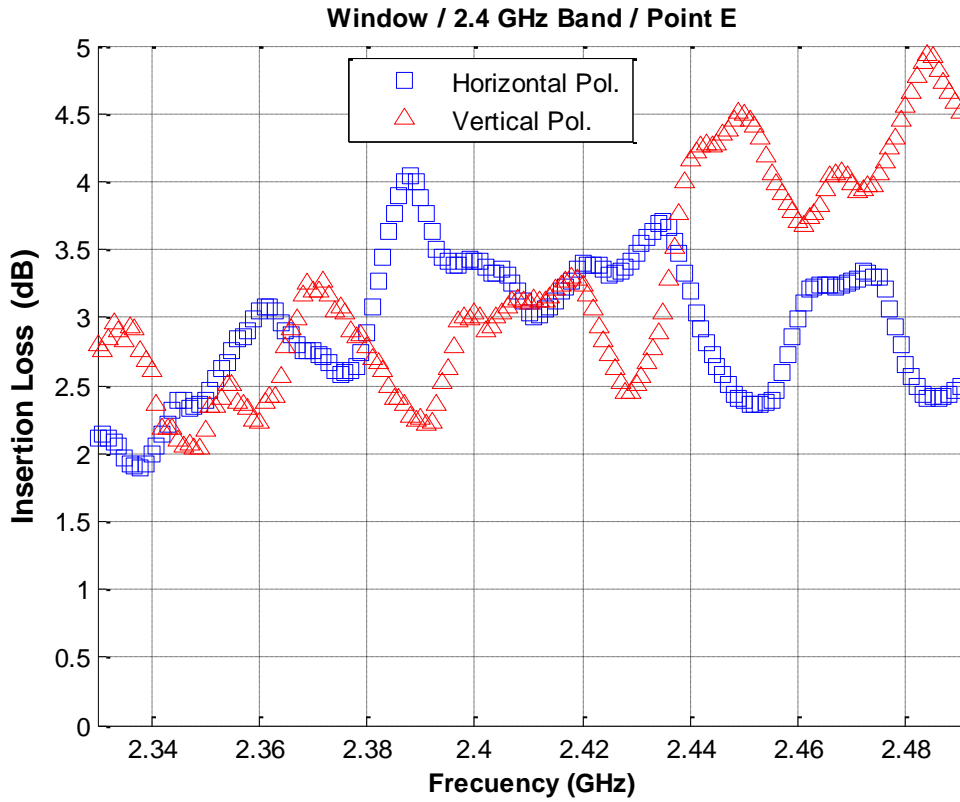


Figura 7.1.11: Medida en el “Punto E” a 2.4 GHz

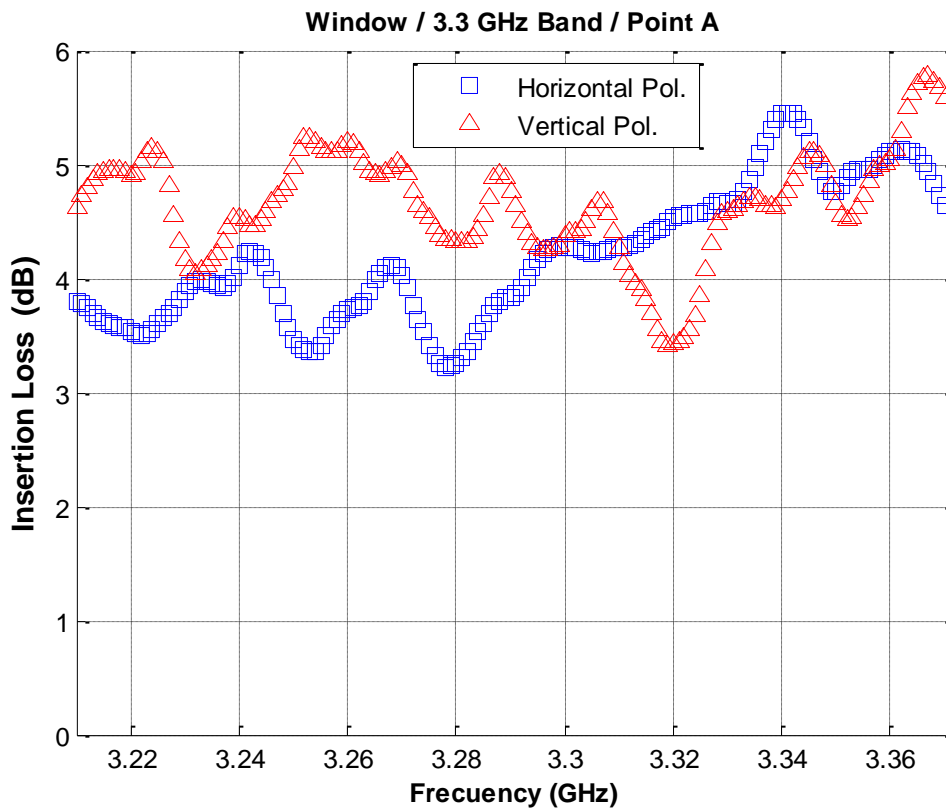


Figura 7.1.12: Medida en el “Punto A” a 3.3 GHz

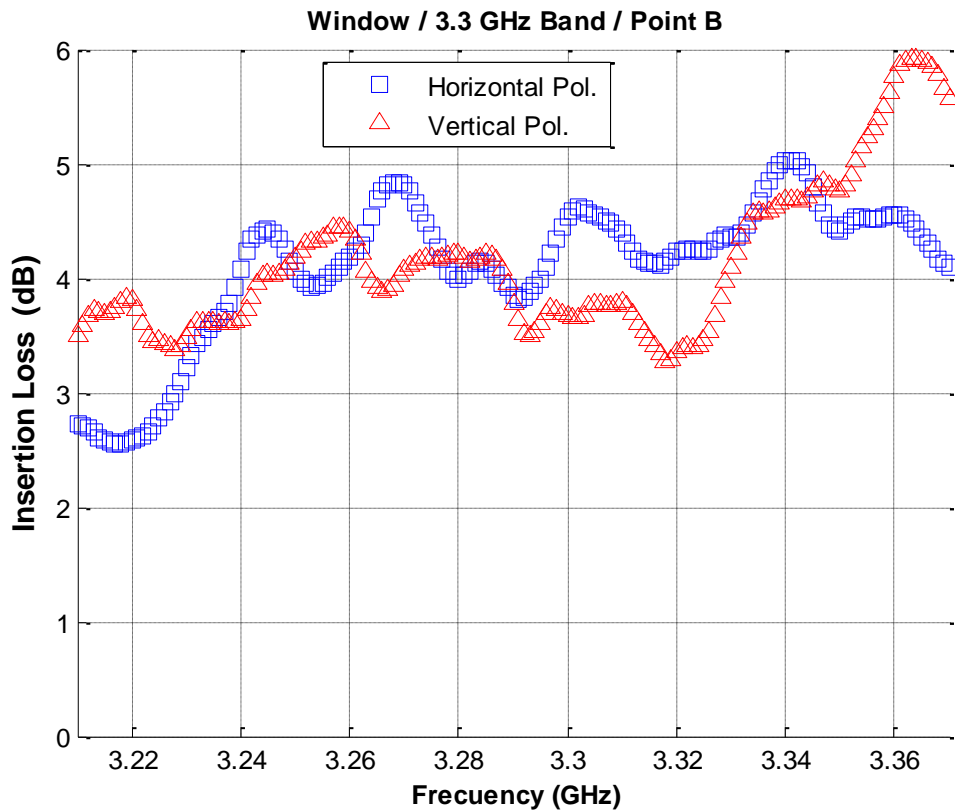


Figura 7.1.13: Medida en el "Punto B" a 3.3 GHz

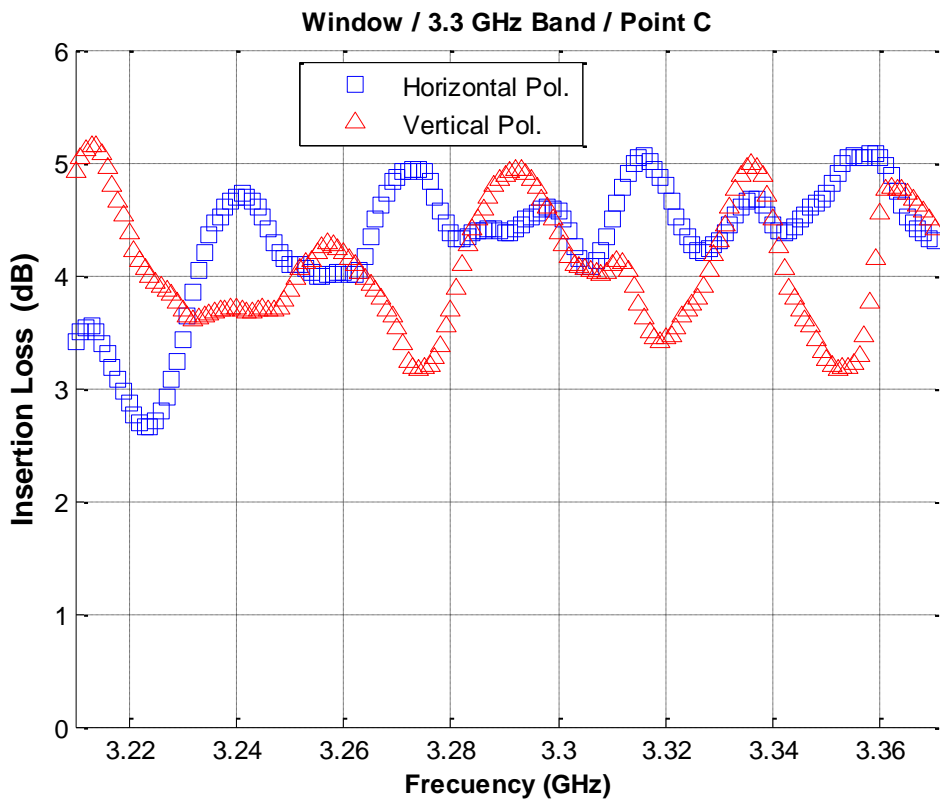


Figura 7.1.14: Medida en el "Punto C" a 3.3 GHz

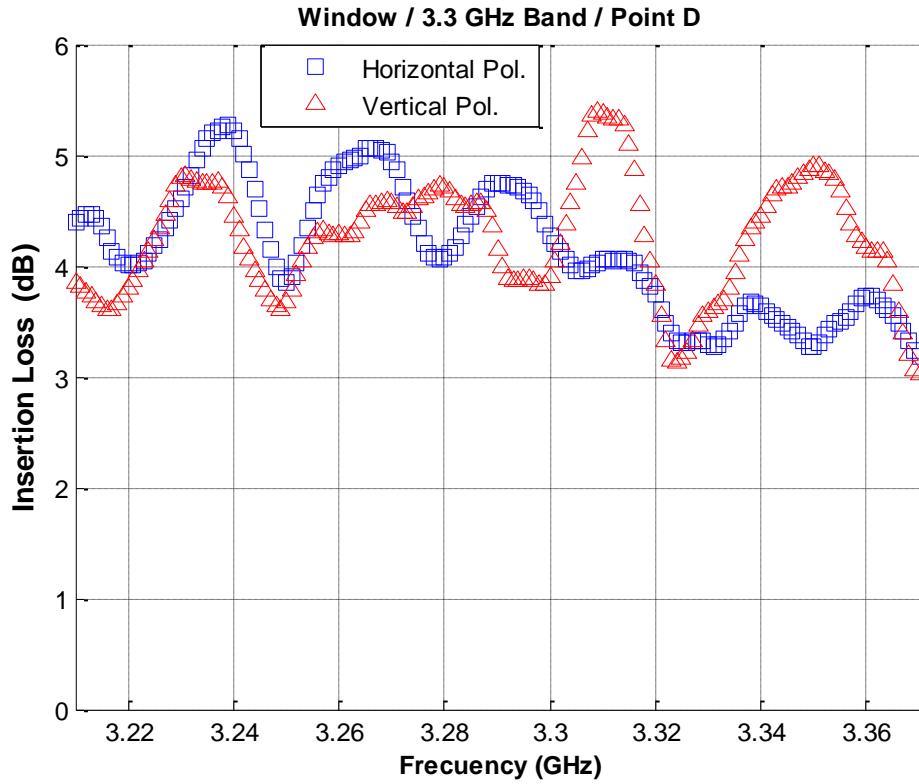


Figura 7.1.15: Medida en el “Punto D” a 3.3 GHz

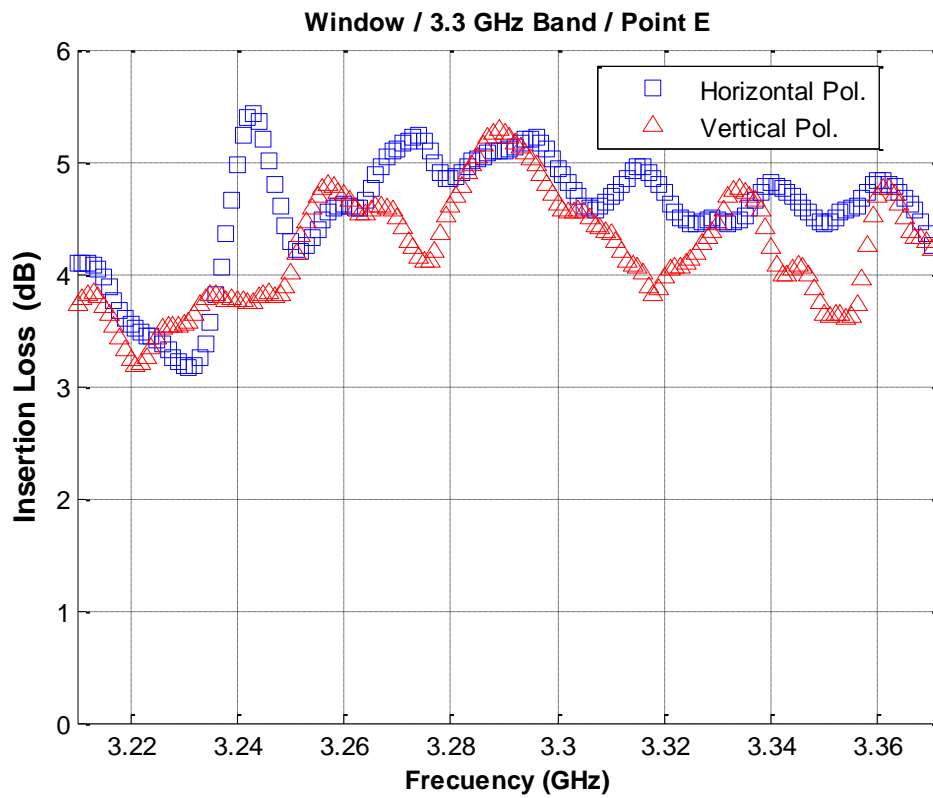


Figura 7.1.16: Medida en el “Punto E” a 3.3 GHz

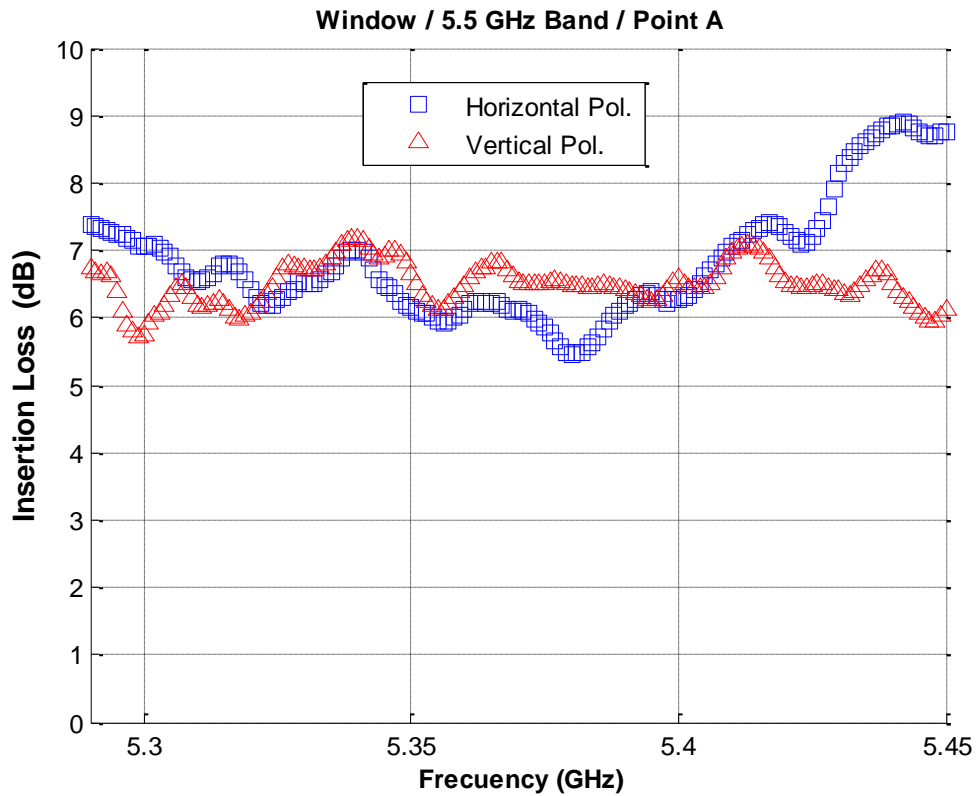


Figura 7.1.17: Medida en el "Punto A" a 5.5 GHz

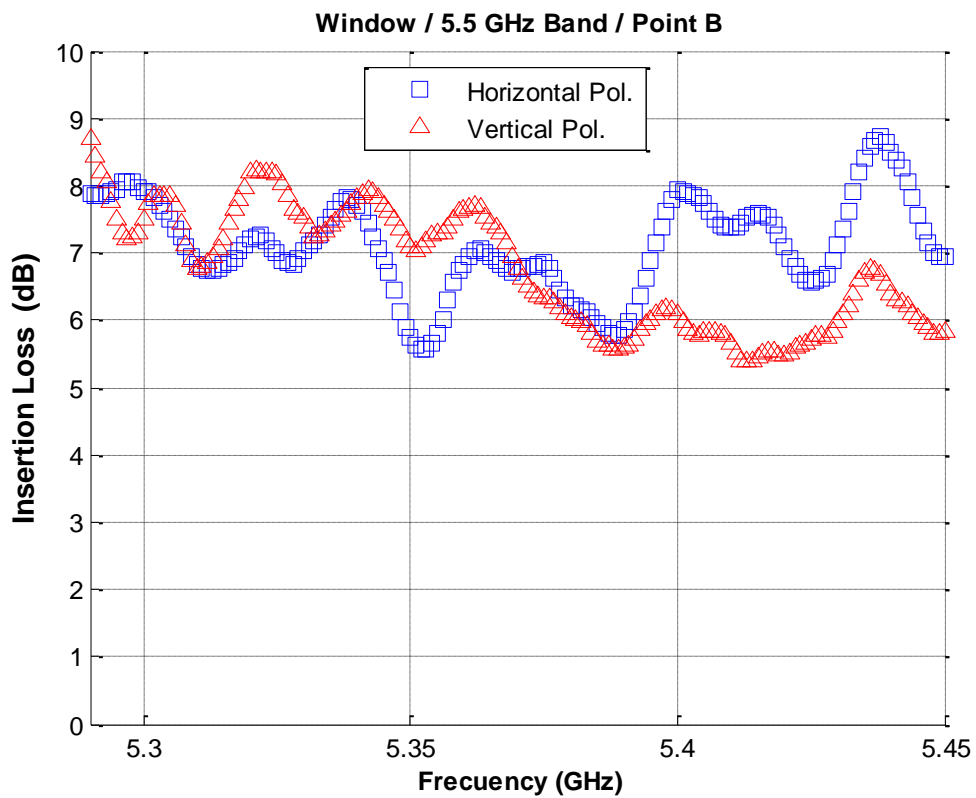


Figura 7.1.18: Medida en el "Punto B" a 5.5 GHz

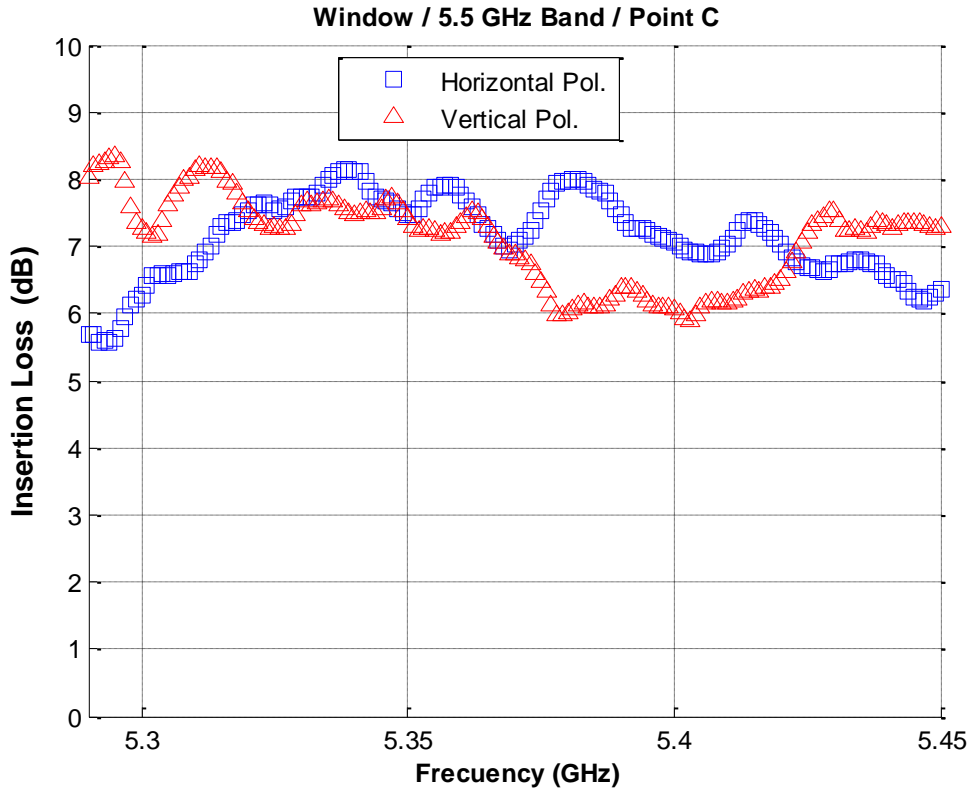


Figura 7.1.19: Medida en el “Punto C” a 5.5 GHz

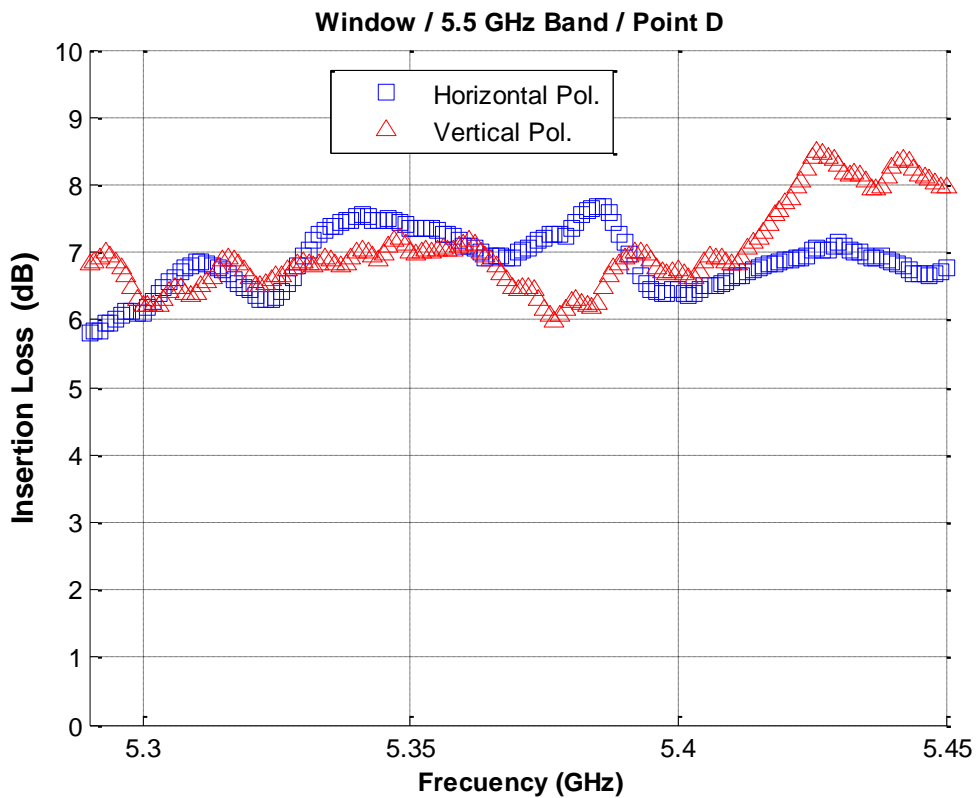


Figura 7.1.20: Medida en el “Punto D” a 5.5 GHz

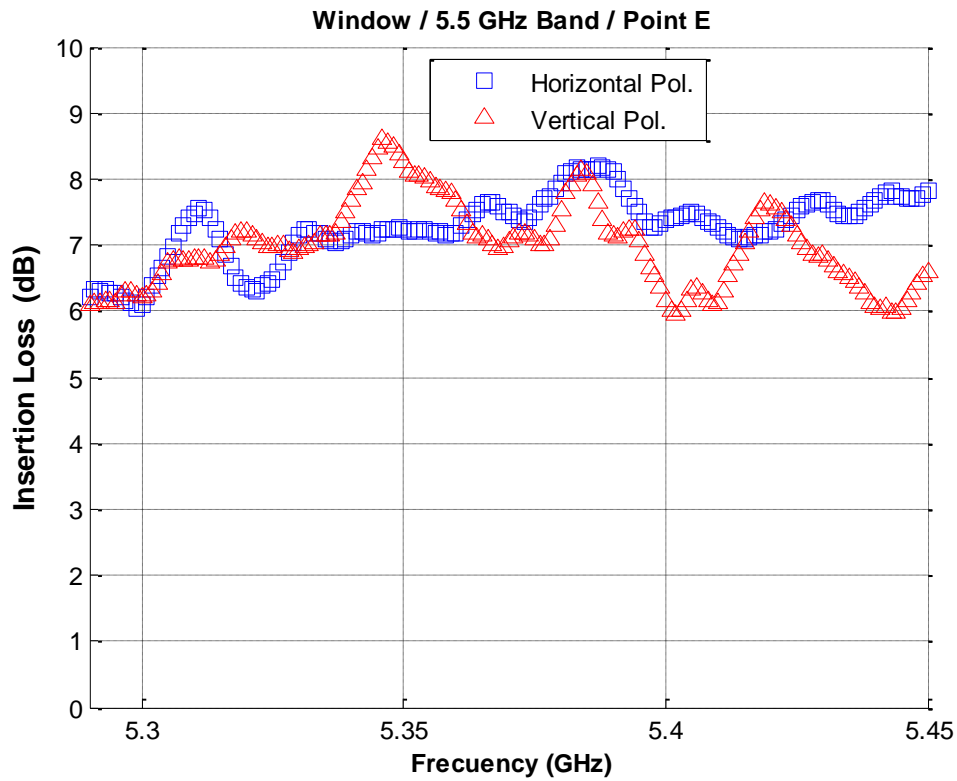


Figura 7.1.21: Medida en el “Punto E” a 5.5 GHz

- A continuación, las siguientes graficas reflejan la comparativa entre las diferentes bandas, es decir, los cambios de nivel de pérdidas al cambiar de antena. Como se realizo anteriormente, cada grafica corresponderá a un punto de interés A, B, C, D o E, donde también realizaremos la comparativa en cuanto a las polarizaciones vertical y horizontal.

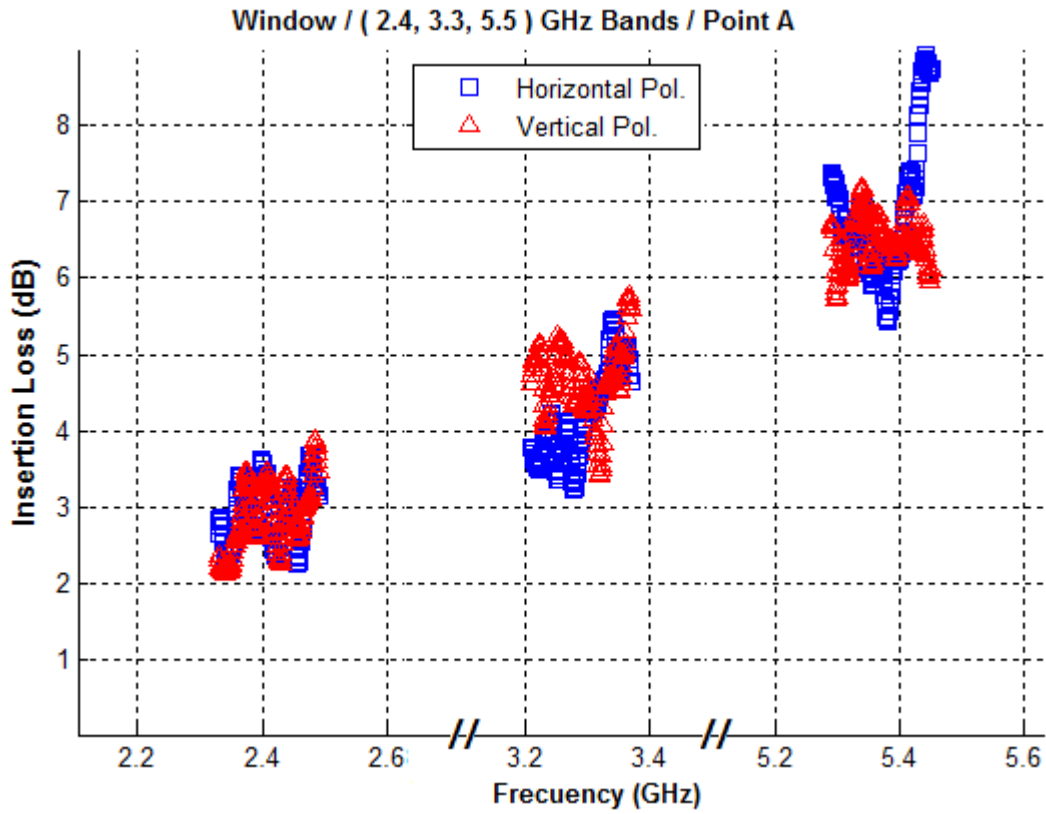


Figura 7.1.22: Medida en el “Punto A” para las tres bandas

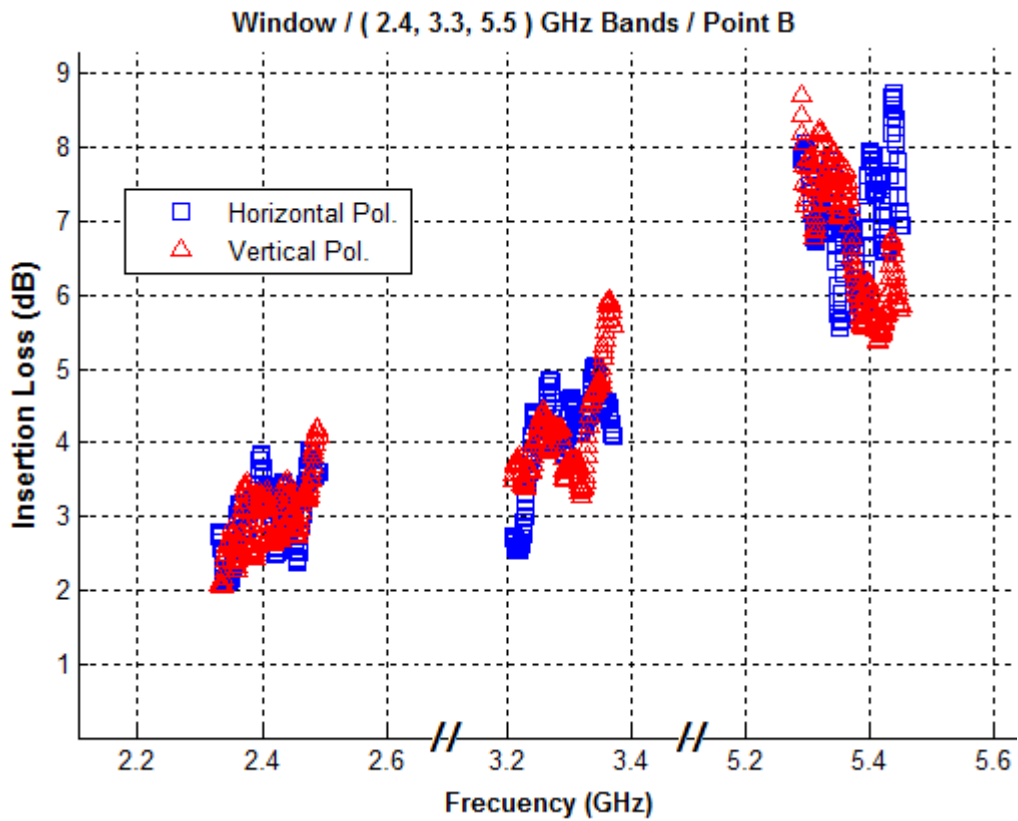


Figura 7.1.23: Medida en el “Punto B” para las tres bandas

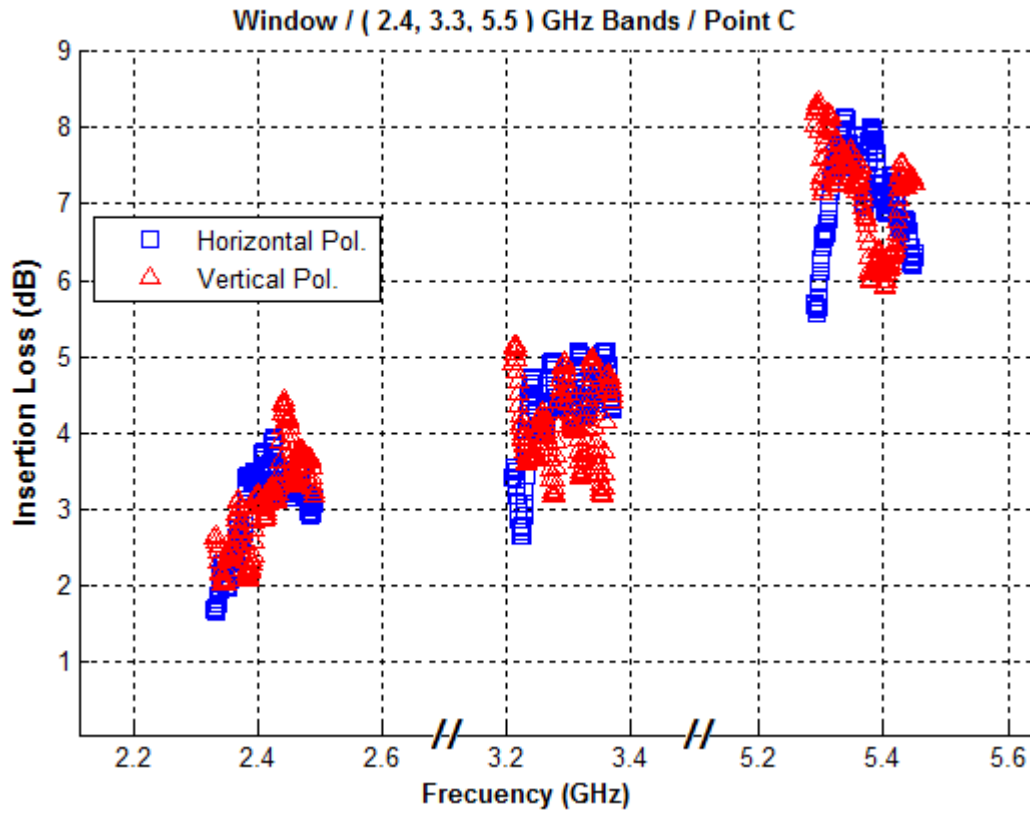


Figura 7.1.24: Medida en el "Punto C" para las tres bandas

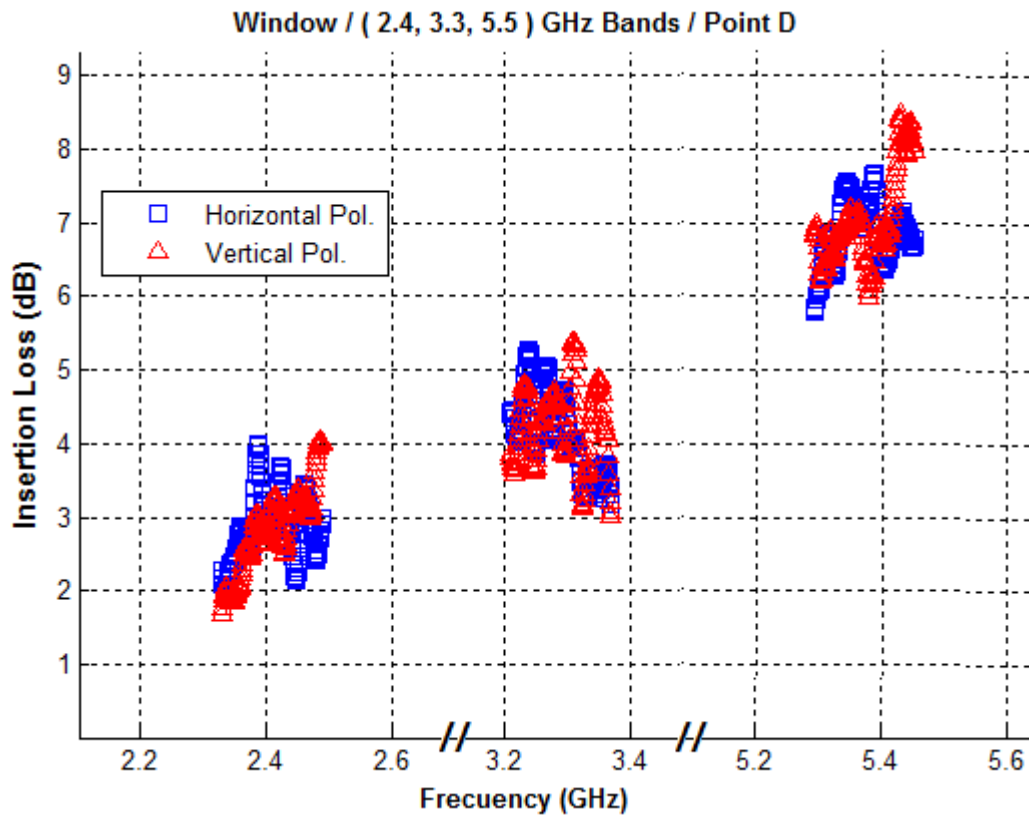


Figura 7.1.25: Medida en el "Punto D" para las tres bandas

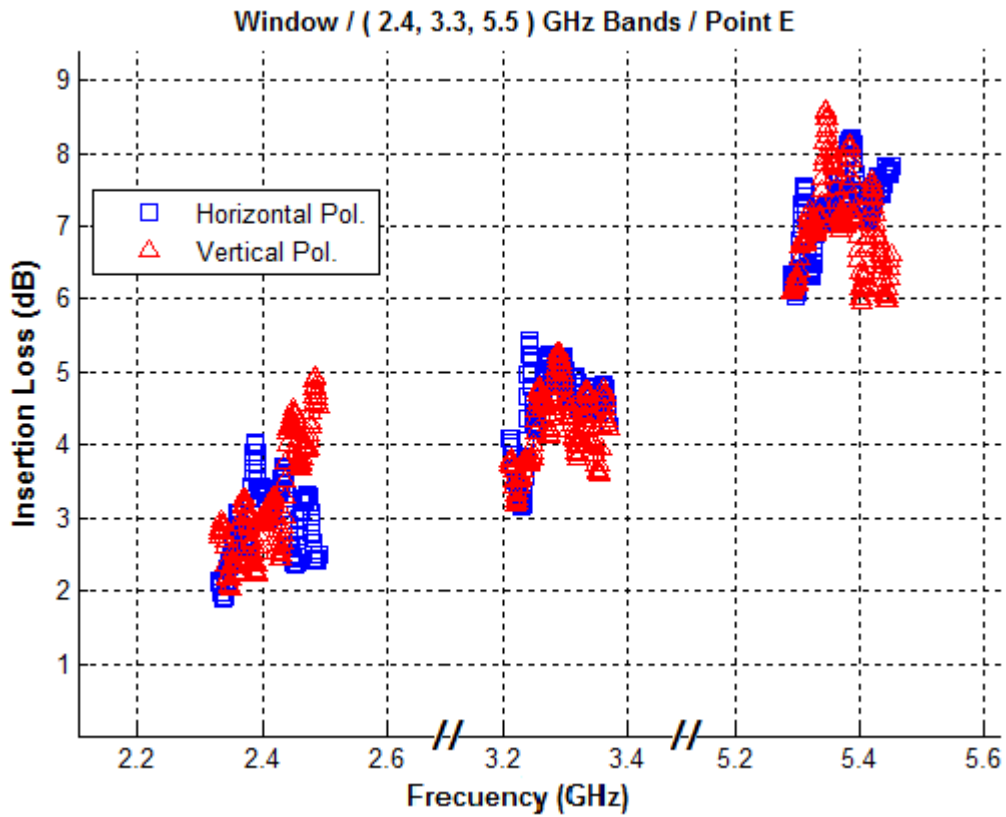


Figura 7.1.26: Medida en el “Punto E” para las tres bandas

- Las siguientes graficas reflejan la media y la desviación estándar para el conjunto de puntos de interés donde se realizará también una comparativa entre las diferentes bandas, es decir, los cambios de nivel de pérdidas al cambiar de antena. Las dos graficas estarán referidas a cada una de las polarizaciones.

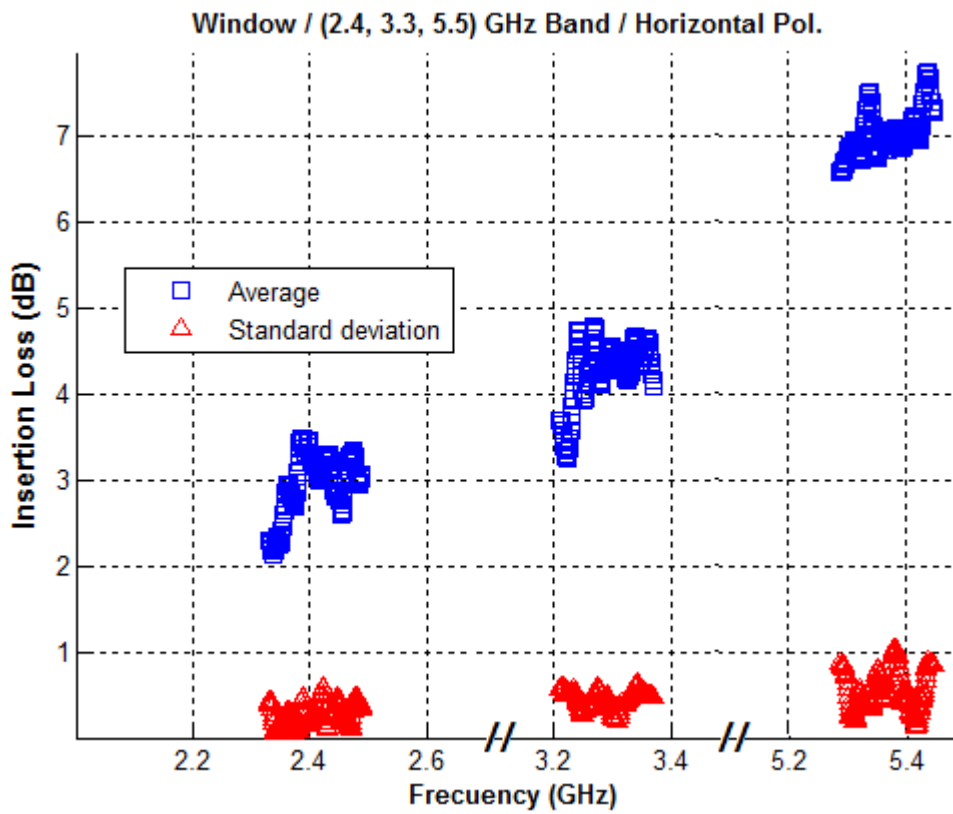


Figura 7.1.28: Media y desviación estándar en Polarización Horizontal

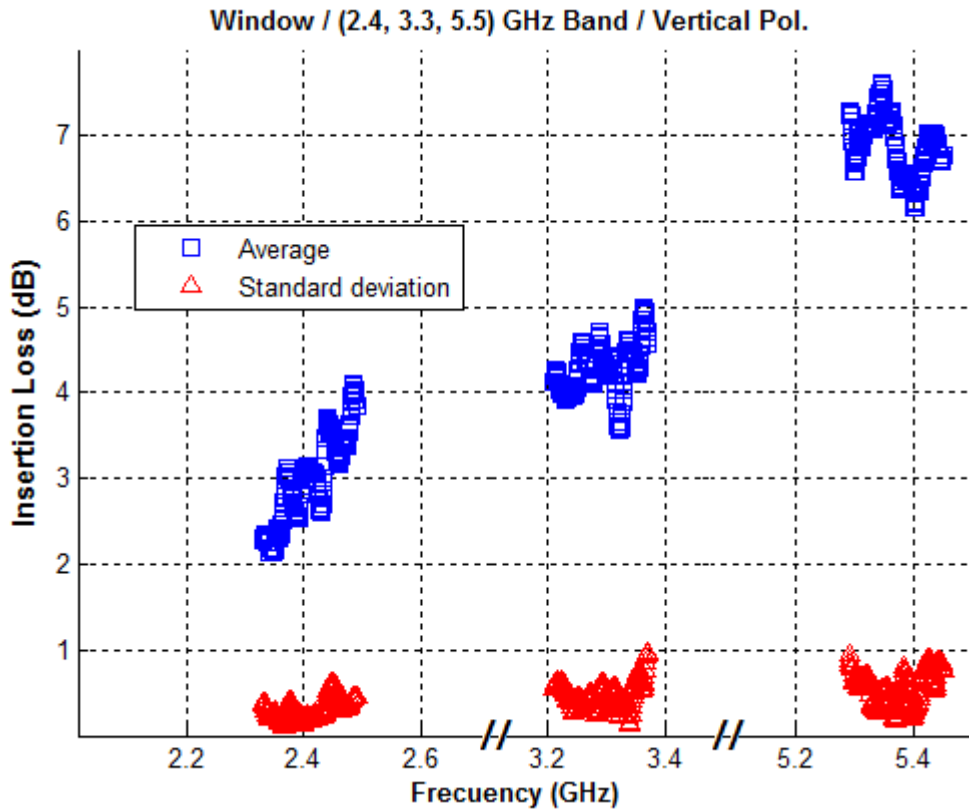


Figura 7.1.28: Media y desviación estándar en Polarización Vertical

- Por último una comparativa del nivel de pérdidas de inserción que se encuentra en cada punto para cada una de las tres bandas:

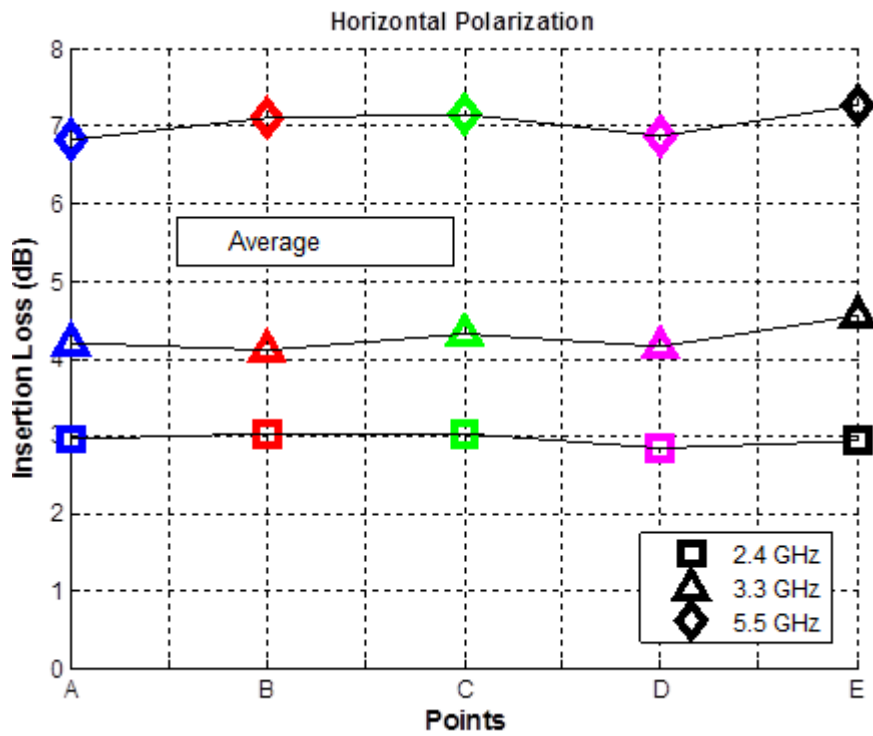


Figura 7.1.29: Pérdida de inserción en cada punto de interés

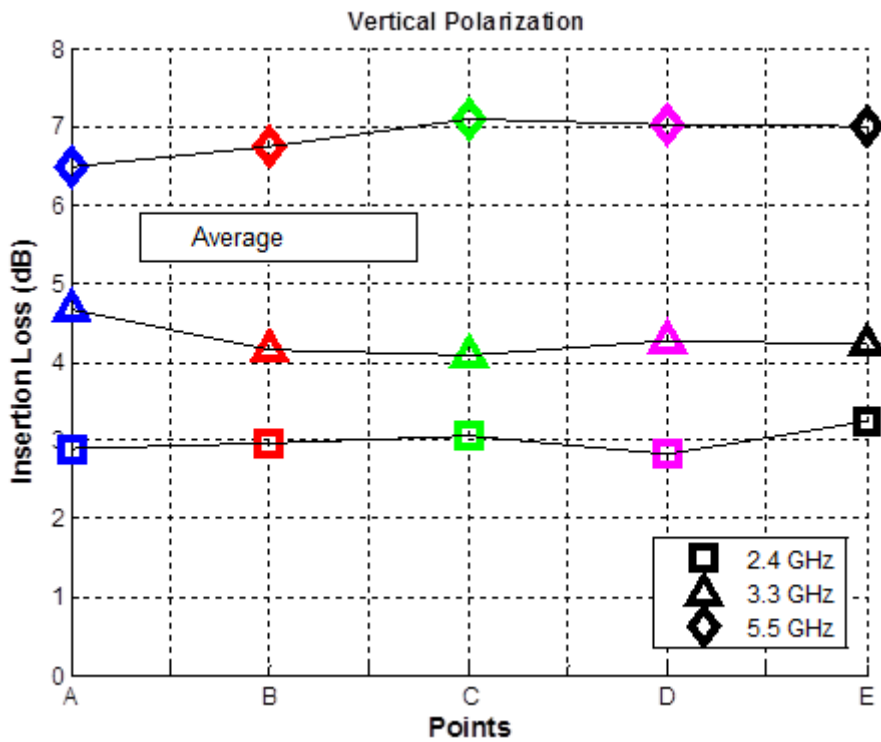


Figura 7.1.30: Pérdida de inserción en cada punto de interés

7.1.4 Conclusiones

De forma generalista, en la literatura encontramos que las pérdidas de inserción que se producen en un cristal simple, suelen ser muy bajas, de tal manera que las pérdidas que se produzcan al atravesar este obstáculo en un radioenlace, casi se deben obviar.

La diferencia, en nuestro caso, es el tipo de cristal en conjunto que tenemos en este escenario. El obstáculo, son dos cristales, donde se encuentra una cámara de aire entre los dos, que actúa de aislante ya sea por conservación de temperatura o para aislar el ruido u otras aplicaciones aislantes. Incluso otro factor a tener en cuenta es la refracción o reflexión caótica que se podría llegar a producir entre los dos cristales.

Por lo tanto las pérdidas producidas van a ser un poco más altas, donde a altas frecuencias quizás si se debe tener en cuenta este obstáculo a la hora de implementar un radioenlace.

Los resultados obtenidos a tener en cuenta son los siguientes:

- Para bandas de frecuencias situadas en 2.4 GHz las pérdidas de inserción producidas rondan los 3 dB.
- Para bandas de frecuencias situadas en 3.3 GHz las pérdidas de inserción producidas rondan los 4 dB.
- Para bandas de frecuencias situadas en 5.5 GHz las pérdidas de inserción producidas rondan los 7 dB.

- En cuanto a la utilización de las dos polarizaciones que ofrecen nuestras antenas, horizontal y vertical, hay que señalar que los resultados obtenidos, en cuanto a pérdidas, no se traducen como cambios significativos, donde los datos obtenidos son muy semejantes para ambas polarizaciones.

- Las desviaciones estándar para todos los puntos de interés para cualquiera de las tres frecuencias empleadas, no superan, en ningún caso, 1 dB. Es decir los puntos escogidos son apropiados debido a la dimensión del cristal, el cual es lo suficiente grande para que efectos de falseo en las medidas que se pueden producir en el marco del cristal, paredes en los laterales, techo o suelo, no lleguen a ser significativos.

7.2 Escenario 2: Pared de ladrillo y hormigón

El segundo escenario que vamos a caracterizar es un pared o muro de ladrillo la cual está construido con hormigón en su interior. Corresponde al exterior de la entrada principal del “Edificio C” de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Autónoma de Madrid.

7.2.1 Estructura, dimensiones y puntos de análisis



Figura 7.2.1 y 7.2.2: Diferentes vistas del muro de ladrillo y hormigón

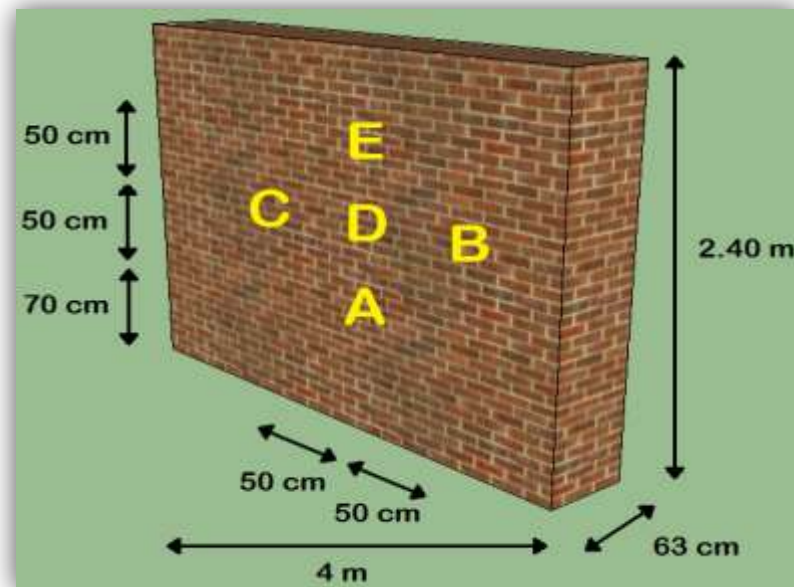


Figura 7.2.3: Dimensiones y puntos de análisis del escenario

7.2.2 Teoría aplicada: Modelización de la estructura

Como hemos comentado anteriormente, este escenario es un muro de ladrillo de hormigón, el cual es predecible que tenga pérdidas de inserción más altas que el anterior escenario. A diferencia del cristal, las pérdidas por reflexión o refracción son mucho más leves, y esto es debido a que el material tiene propiedades poco reflexivas al contrario del el agua o el cristal. Por otro lado las pérdidas por absorción o por penetración del material si serán claramente destacables.

Por todo ello en este caso vamos a fijarnos en otros tipos de fenómenos que pueden afectar a la señal:

- **Difracción:** Los puntos elegidos para analizar el escenario están concentrados en el medio del muro, de tal manera que evitemos los laterales, el suelo o el alto del muro. Si hubiéramos elegido puntos cerca del lateral donde el muro acaba, podríamos encontrar con una clara difracción de la señal, lo cual podría falsear la medida de la pérdida de inserción propia del material que constituye el muro.
- **Multitrayecto por reflexión:** Igualmente los puntos elegidos para analizar el escenario están también concentrados en el medio del muro, de tal manera que se evite el multitrayecto que puede ocasionar el lateral de la derecha del muro donde se localizan las puertas principales del edificio donde se sitúa la pared. De igual manera la reflexión que puede ocasionarse en el suelo cuando se desean medir puntos de interés a poca distancia de la superficie es también una de las situaciones a evitar.

7.2.3 Resultados y análisis del escenario

- A continuación vamos exponer las pérdidas de inserción que hemos obtenido para los diferentes puntos: A, B, C, D, E en los tres tipos de bandas de frecuencias utilizadas y para los dos tipos de polarización H y V que poseen nuestras antenas.

A partir de todos estos datos, hemos representado en diferentes tipos de graficas las pérdidas de inserción obtenidas. En primer lugar vamos exponer las medidas en cada punto de análisis y para cada una de las frecuencias, diferenciando las medidas en polarización horizontal y polarización vertical. Las graficas son las siguientes:

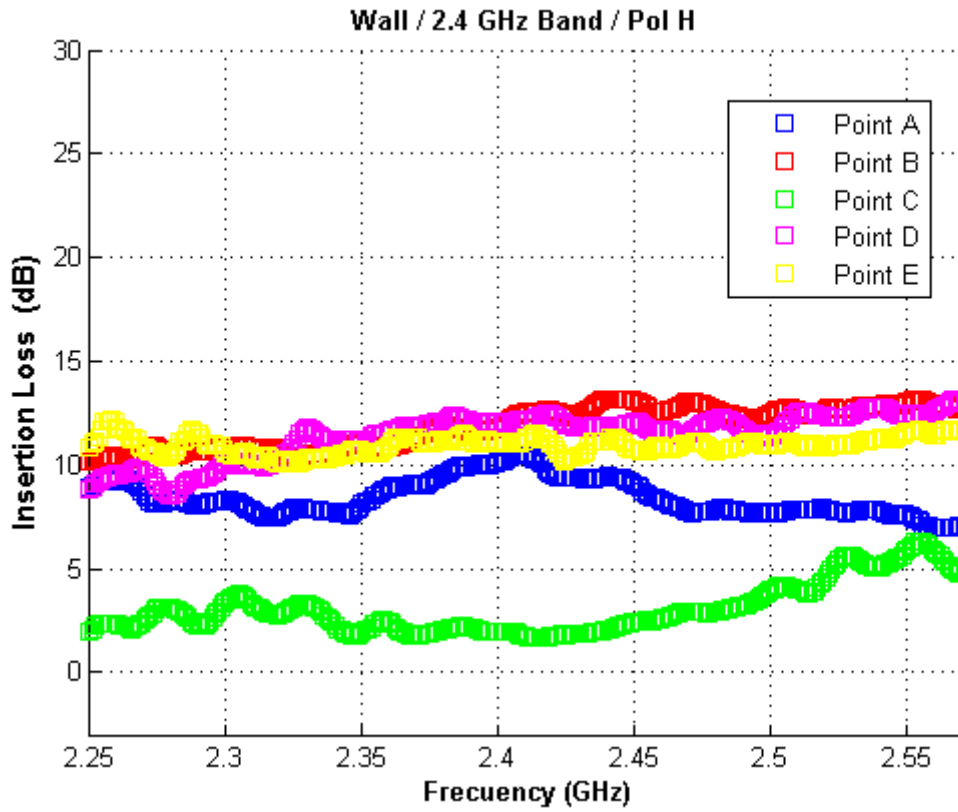


Figura 7.2.4: Medidas para 2.4 GHz en Polarización Horizontal

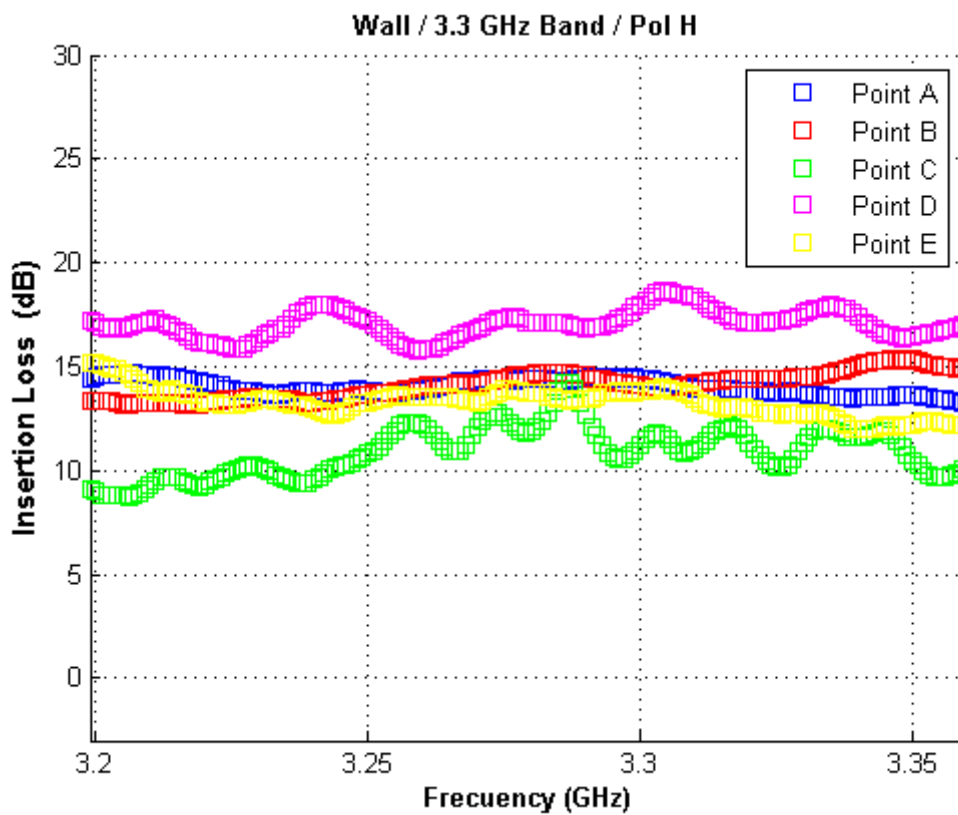


Figura 7.2.5: Medidas para 3.3 GHz en Polarización Horizontal

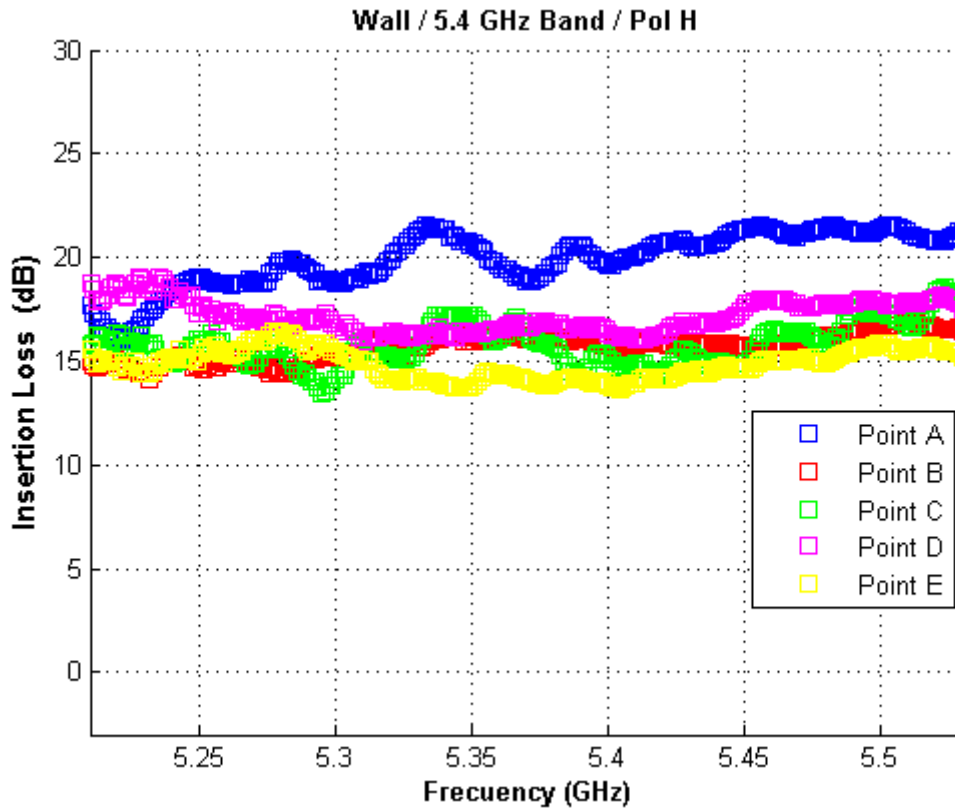


Figura 7.2.6: Medidas para 5.5 GHz en Polarización Horizontal

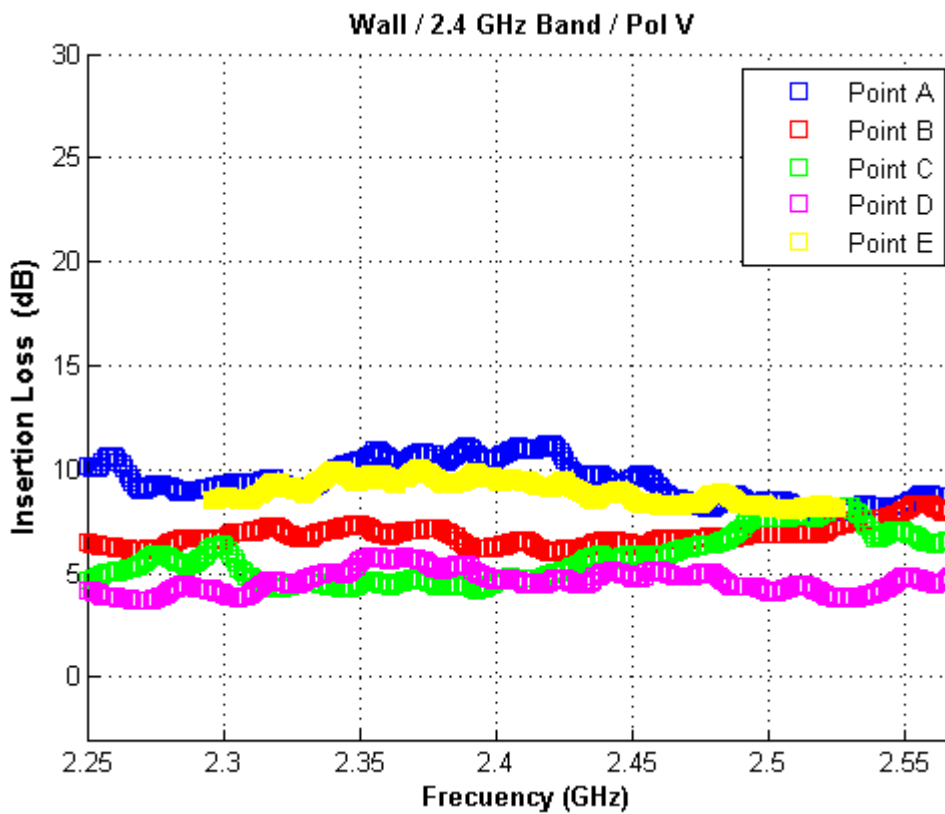


Figura 7.2.7: Medidas para 2.4 GHz en Polarización Vertical

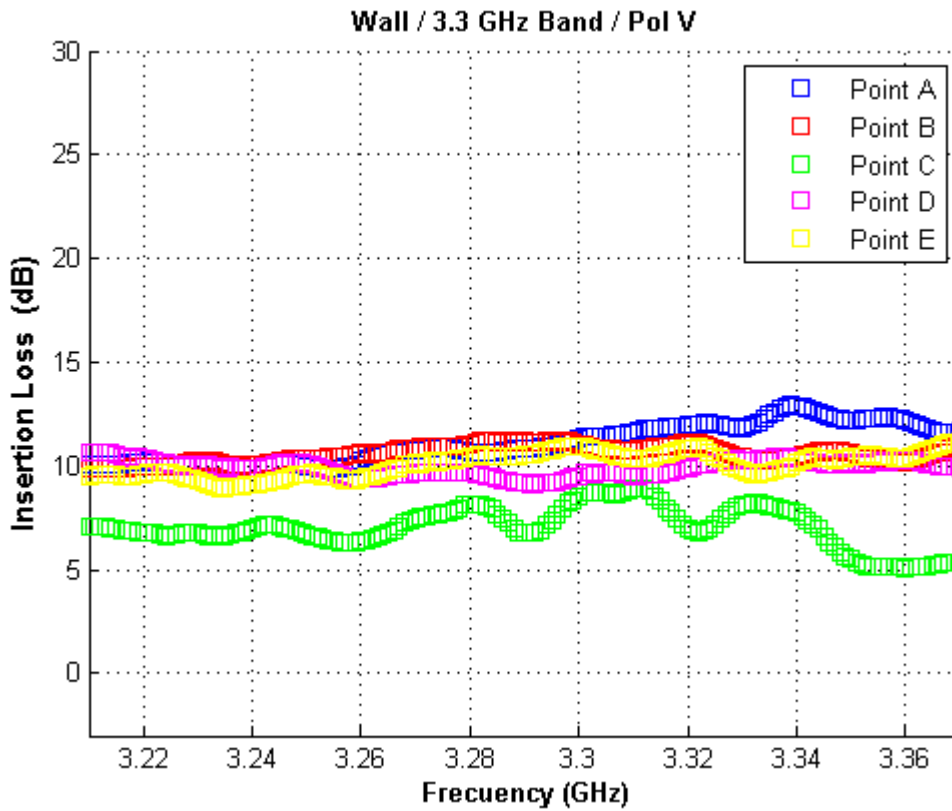


Figura 7.2.8: Medidas para 3.3 GHz en Polarización Vertical

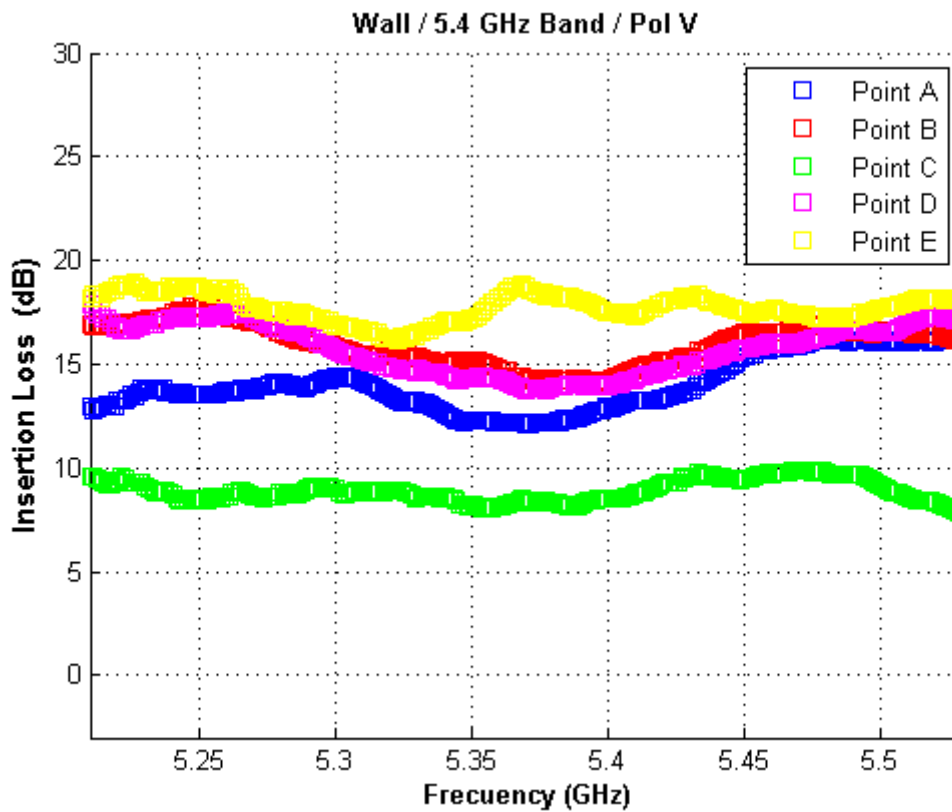


Figura 7.2.9: Medidas para 5.4 GHz en Polarización Vertical

- A continuación vamos exponer las pérdidas de inserción para cada punto, comparando su nivel para cada unas de las tres bandas en cada una de las polarizaciones:

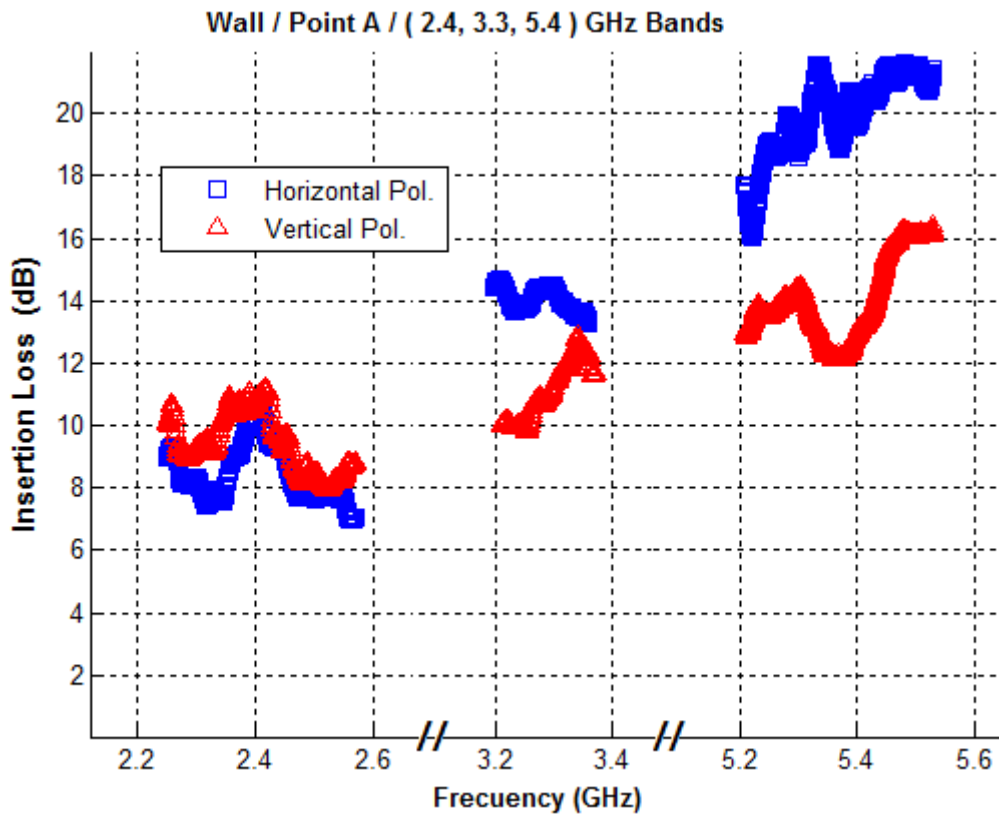


Figura 7.2.10: Medida para el "Punto A" para las tres bandas

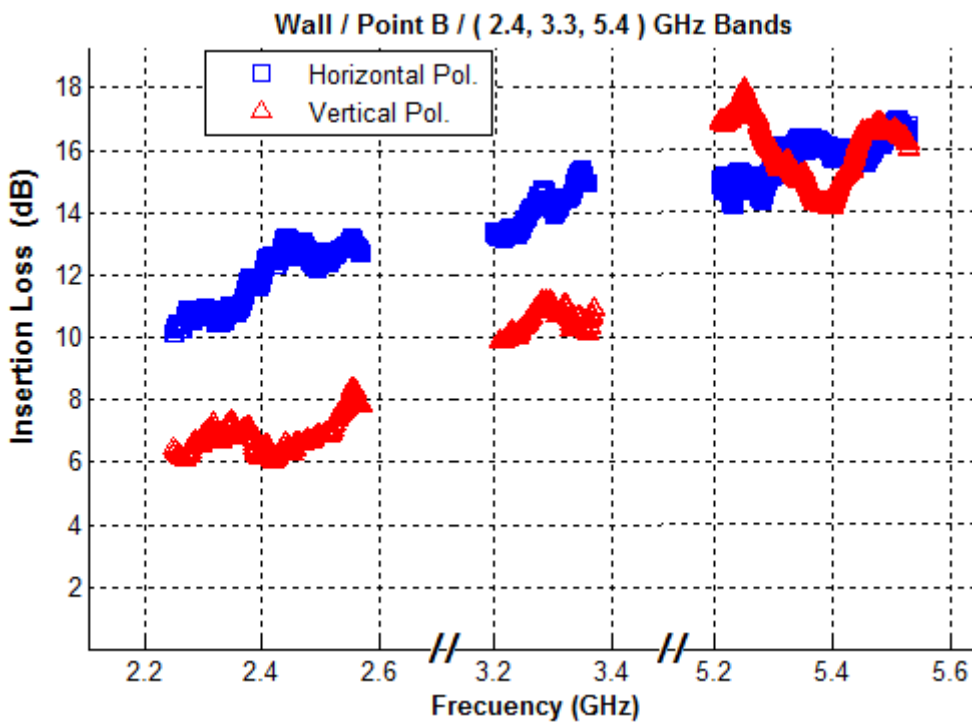


Figura 7.2.11: Medida para el "Punto B" para las tres bandas

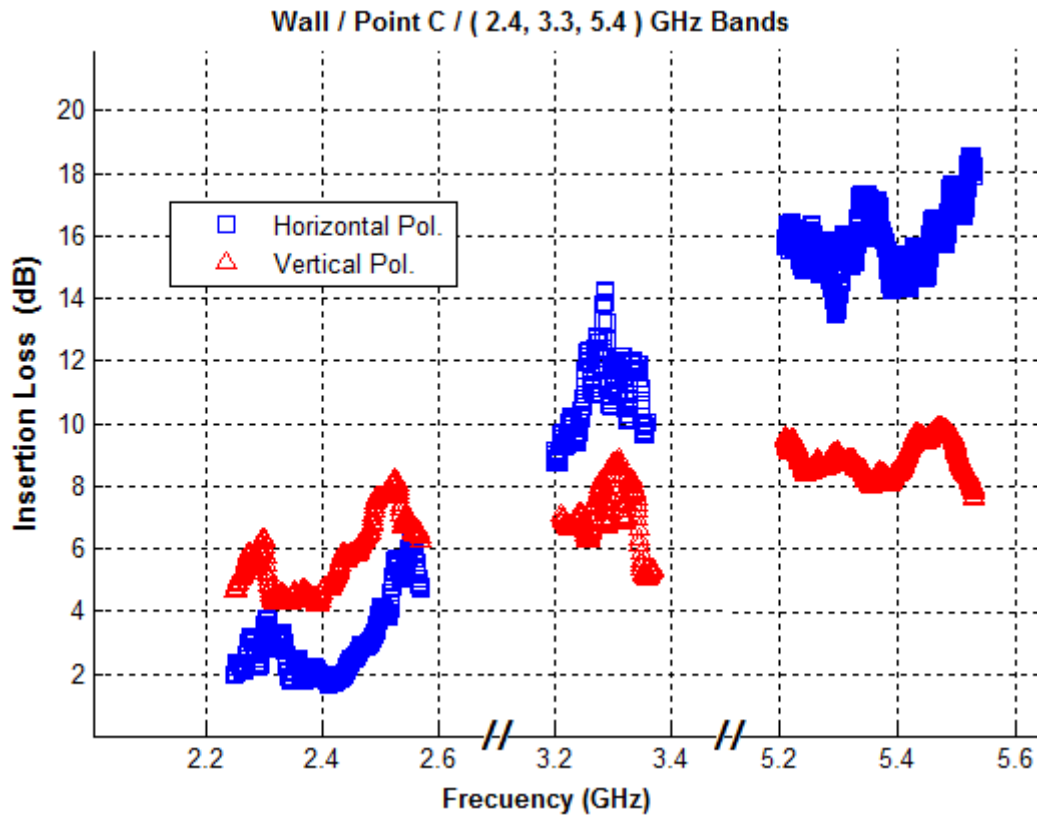


Figura 7.2.12: Medida para el “Punto C” para las tres bandas

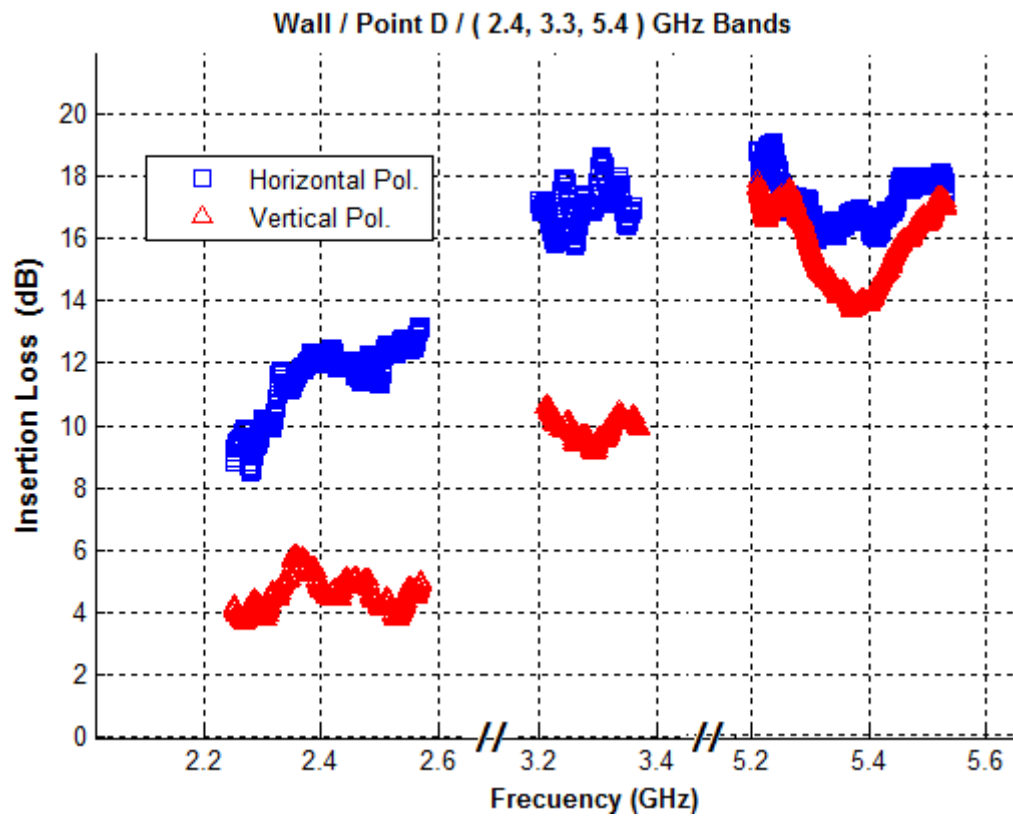


Figura 7.2.13: Medida para el “Punto D” para las tres bandas

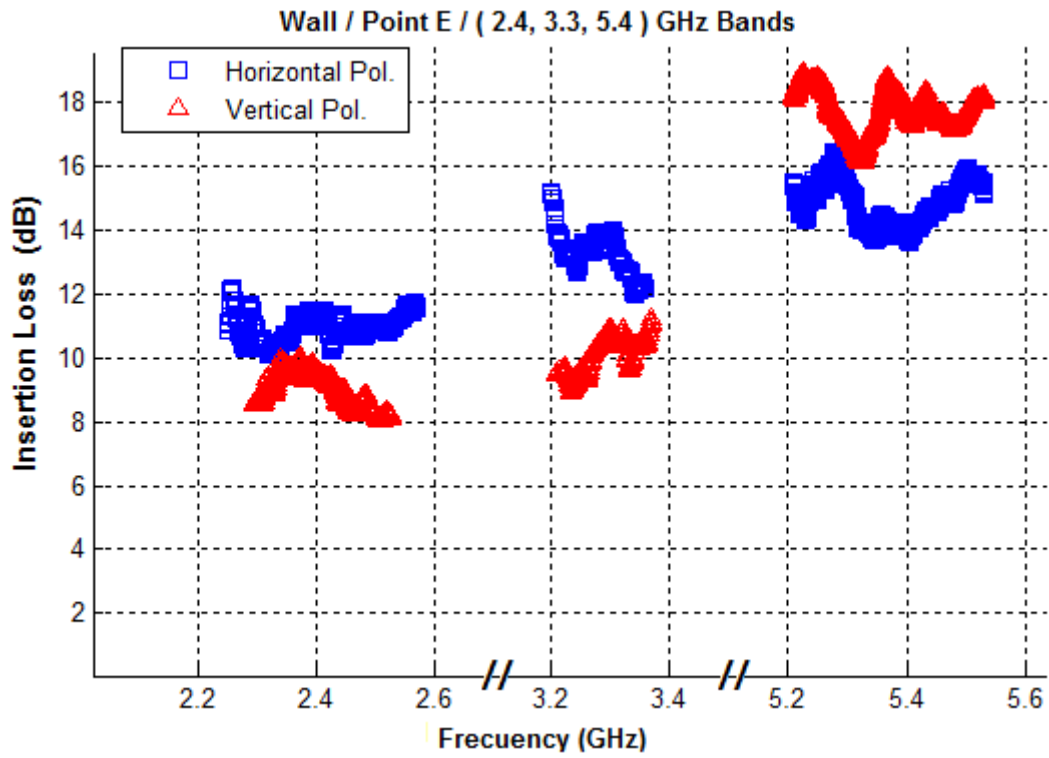


Figura 7.2.14: Medida para el "Punto E" para las tres bandas

- Por último vamos señalar la media y la desviación estándar para los puntos de interés, comparando su nivel en cada unas de las tres bandas y para cada tipo de polarización:

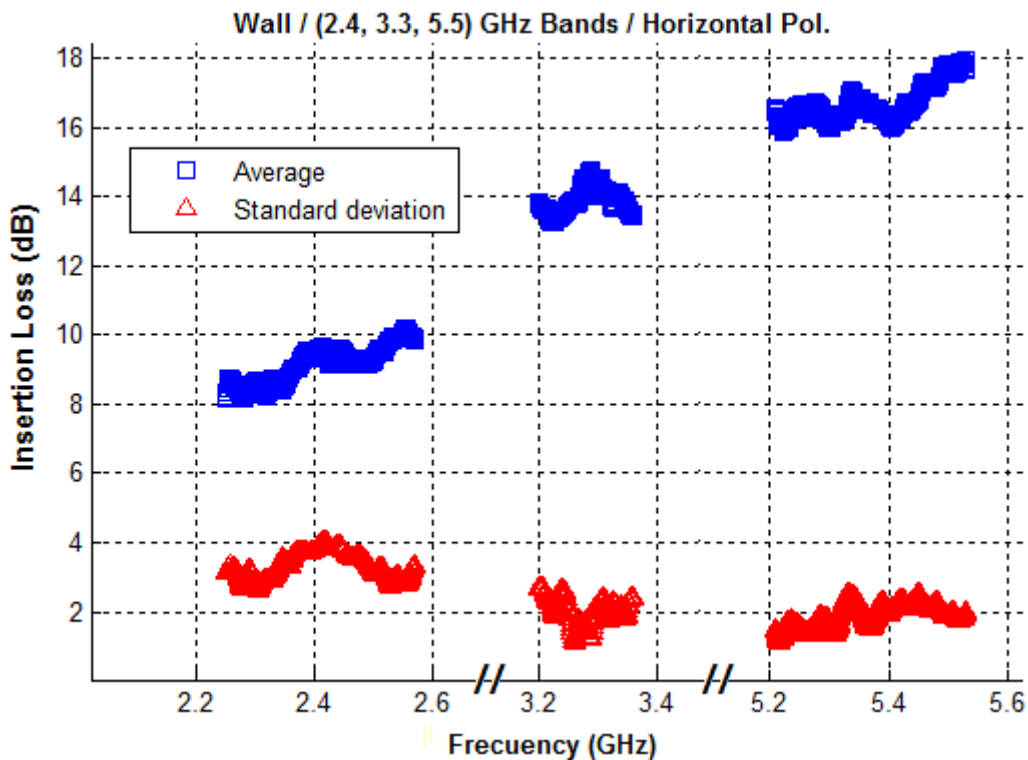


Figura 7.1.15: Media y desviación estándar en Polarización Horizontal

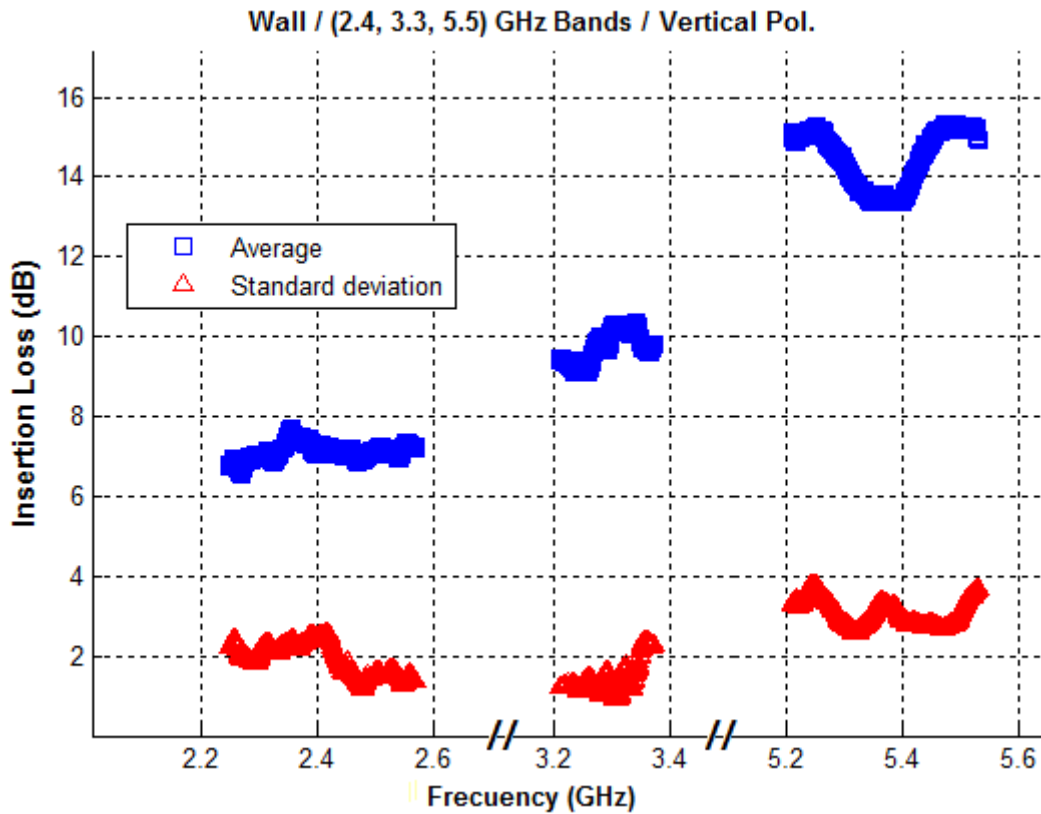


Figura 7.1.16: Media y desviación estándar en Polarización Vertical

7.2.4 Conclusiones

En la literatura encontramos que las pérdidas de inserción que se producen en muros de ladrillo y de hormigón, son altas y por supuesto más destacables que las ofrecidas en el cristal anterior. Por tanto son relevantes a la hora de considerarlas en un radioenlace, y pueden llegar a ser un inconveniente importante a la hora de determinar una cobertura en el enlace. Para hacernos una idea de la repercusión, las conclusiones extraídas son las siguientes:

- Para bandas de frecuencias situadas en 2.4 GHz las pérdidas de inserción producidas rondan los 9 dB en polarización horizontal y los 7 dB en vertical.
- Para bandas de frecuencias situadas en 3.3 GHz las pérdidas de inserción producidas rondan los 14 dB en polarización horizontal y los 10 dB en vertical.
- Para bandas de frecuencias situadas en 5.5 GHz las pérdidas de inserción producidas rondan los 17 dB en polarización horizontal y los 15 dB en vertical.
- Las desviaciones estándar para todos los puntos de interés para cualquiera de las tres frecuencias empleadas, no superan, en ningún caso, los 4 dB. Es decir los puntos escogidos son apropiados debido a la dimensión del muro, el cual es lo suficiente grande para que efectos de falseo en las medidas como la difracción del lateral del muro o techo, o el multitrayecto por reflexión del otro lateral o el suelo, no se vean muy afectadas. Aun así estas desviaciones respecto a los puntos de interés son más altas que las del cristal.
- En cuanto a la utilización de las dos polarizaciones que ofrecen nuestras antenas, horizontal y vertical, hay que señalar que existen diferencias, esto es debido en otros, a la disposición del ladrillo en el muro de hormigón al penetrar la señal en este.

7.3 Escenario 3: Puerta de metal con ventana de ojo de buey

Este tercer escenario que vamos a caracterizar es una doble puerta metálica la cual contiene dos ventanas pequeñas llamadas “Ventanas de Ojo de Buey”. Están situadas en la primera planta del “Edificio C” en Escuela Politécnica Superior de la Universidad Autónoma de Madrid.

7.3.1 Estructura, dimensiones y puntos de análisis



Figura 7.3.1 y 7.3.2: Diferentes vistas de la puerta metálica con ojo de buey

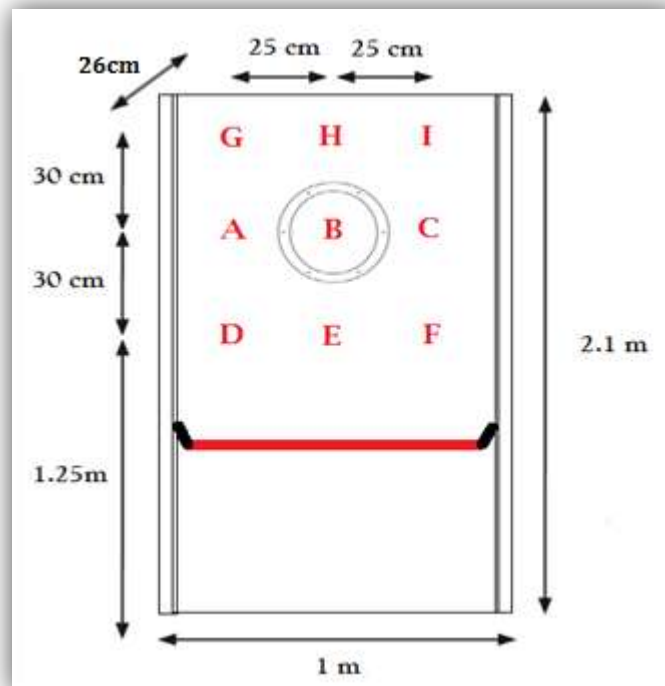


Figura 7.3.3: Dimensiones y puntos de análisis del escenario

7.3.2 Teoría aplicada: Modelización de la estructura

En este escenario se encuentra como obstáculo una puerta metálica. Este tipo de material se puede considerar un absorbente perfecto, como ya se comentó en el “Capítulo 3” en el tema de “Absorción”, y esto supone, en términos de pérdidas de inserción, un alto porcentaje de pérdida de señal. El metal, por tanto, es un gran aislante de ondas de radiofrecuencia, y es obvio suponer, que en este escenario encontraremos un alto nivel de pérdidas con respecto a los dos anteriores escenarios.

Por otro lado, tenemos la ventana, la cual se comportará de una forma radicalmente distinta al metal. Haciendo una similitud con el escenario 1 (Cristal doble con cámara de aire), cuando se midan las pérdidas en la ventana ocurrirán los mismos fenómenos que en el escenario antes descrito, salvo por un único factor, la dimensión de la ventana. Al ser pequeña y estar rodeada de metal, considerar solo las pérdidas del cristal sería un grave error, y por ello se hará un exhaustivo estudio, donde los puntos de interés elegidos sean realmente apropiados, y se puedan sacar conclusiones adecuadas al escenario.

Igualmente existirán en esta caracterización del modelo, otros tipos de fenómenos que pueden afectar a la señal, y hay que tener en cuenta:

- **Difracción:** La ventana de ojo de buey, va a actuar como apertura para la señal en el radioenlace, donde se producirá difracción en los puntos de la puerta metálica que estén próximos a la ventana.
- **Reflexión:** El metal es un material claramente reflexivo, donde las ondas emitidas al chocar con la puerta, se verán claramente reflejadas hacia la antena transmisora. Por ello se ha tenido muy en cuenta la distancia de la antena transmisora con respecto a la puerta, para que no se produzcan, en la medida de lo posible, falseos en las medidas e interferencias.

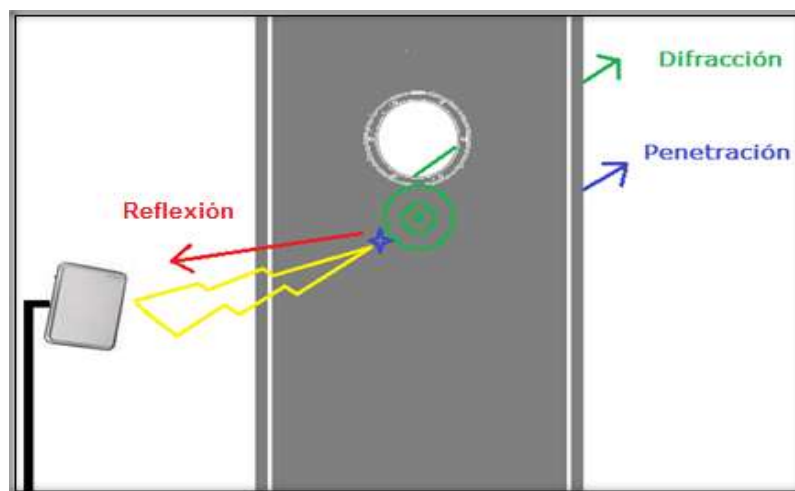


Figura 7.3.4: Efectos y fenómenos en la caracterización del escenario

- **Multitrayecto:** Al un lado de la puerta podemos encontrar una pared mientras que al otro lado la otra puerta perteneciente al bloque. Debido a estos dos factores se ha extremado la correcta medición del escenario para que afecte lo menos posible al falseo de la medida.

7.3.3 Resultados y análisis del escenario

- A continuación vamos exponer las pérdidas de inserción que hemos obtenido para los diferentes puntos de interés A, B, C, D, E, F, G, H, I en cada una de las tres bandas de frecuencias utilizadas por nuestras antenas así como también para los dos tipos de polarización existentes, horizontal y vertical:

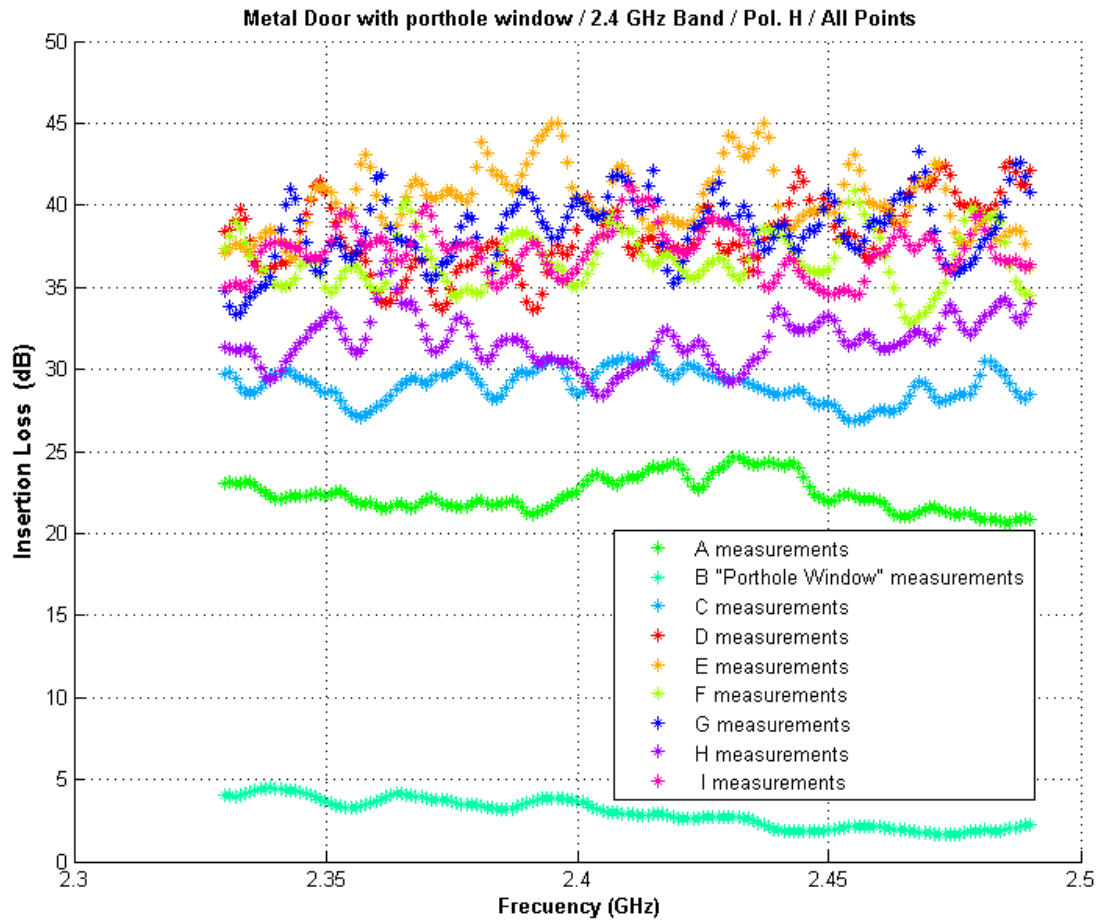


Figura 7.3.5: Medidas en la banda de 2.4 GHz con Polarización Horizontal

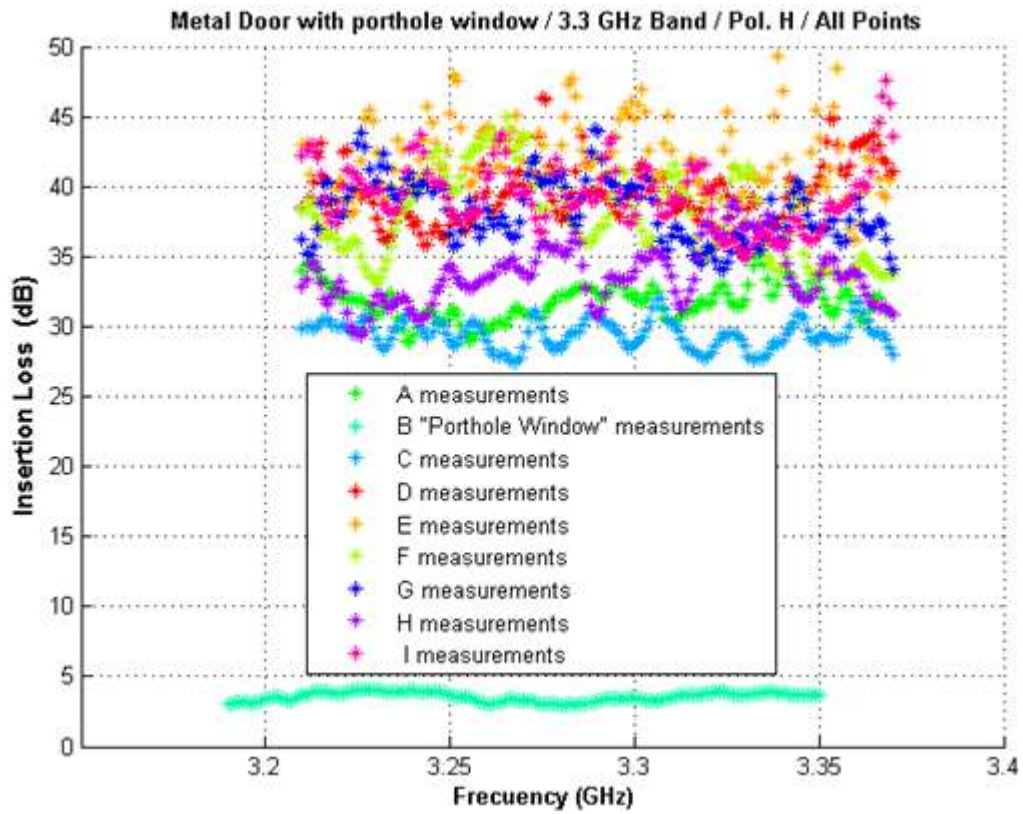


Figura 7.3.6: Medidas en la banda de 3.3 GHz con Polarización Horizontal

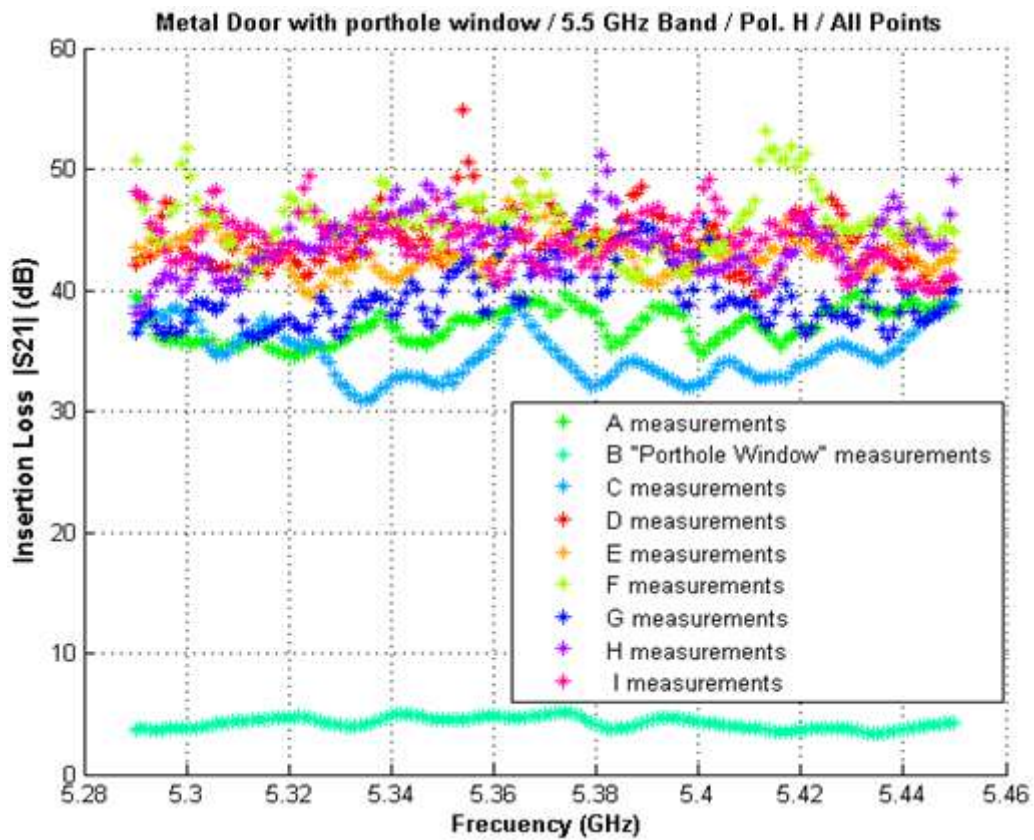


Figura 7.3.7: Medidas en la banda de 5.5 GHz con Polarización Horizontal

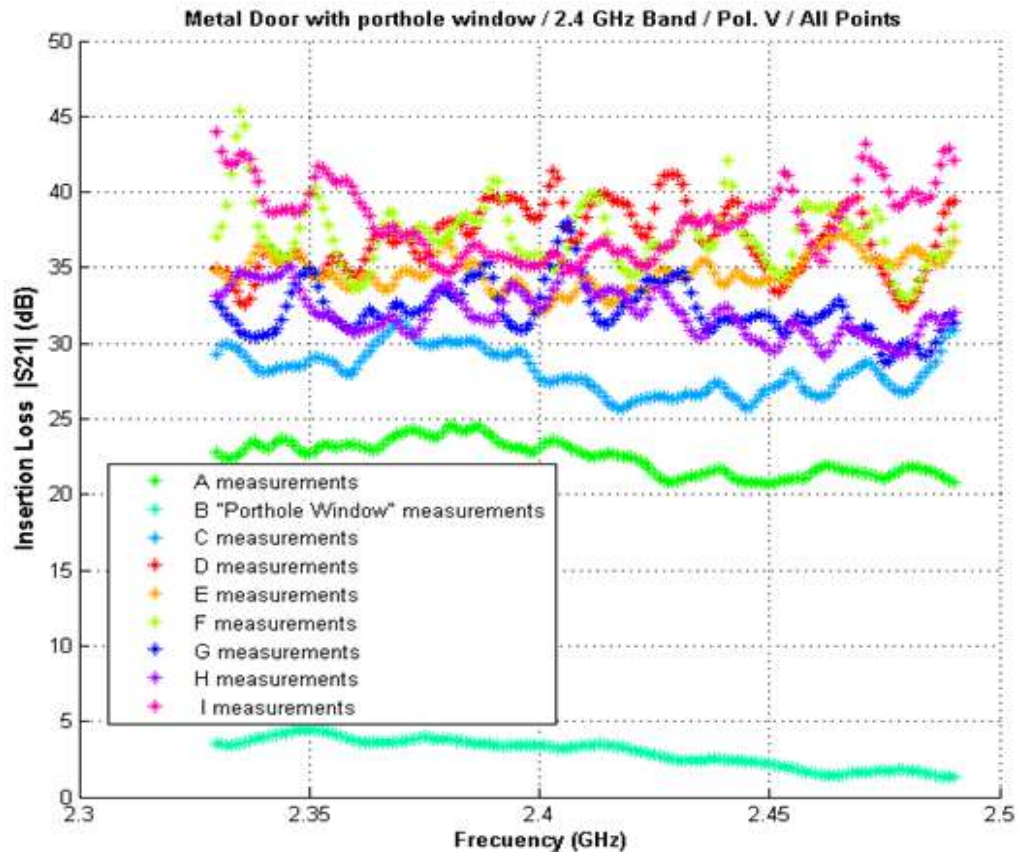


Figura 7.3.8: Medidas en la banda de 2.4 GHz con Polarización Vertical

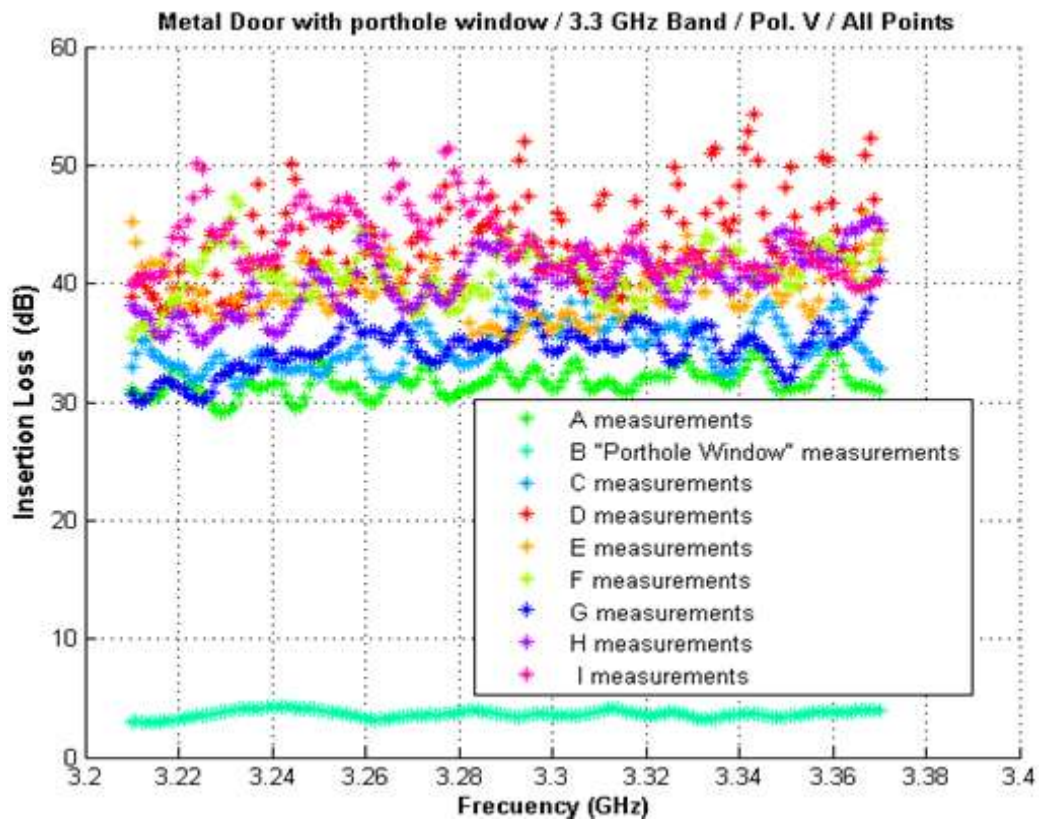


Figura 7.3.9: Medidas en la banda de 3.3 GHz con Polarización Vertical

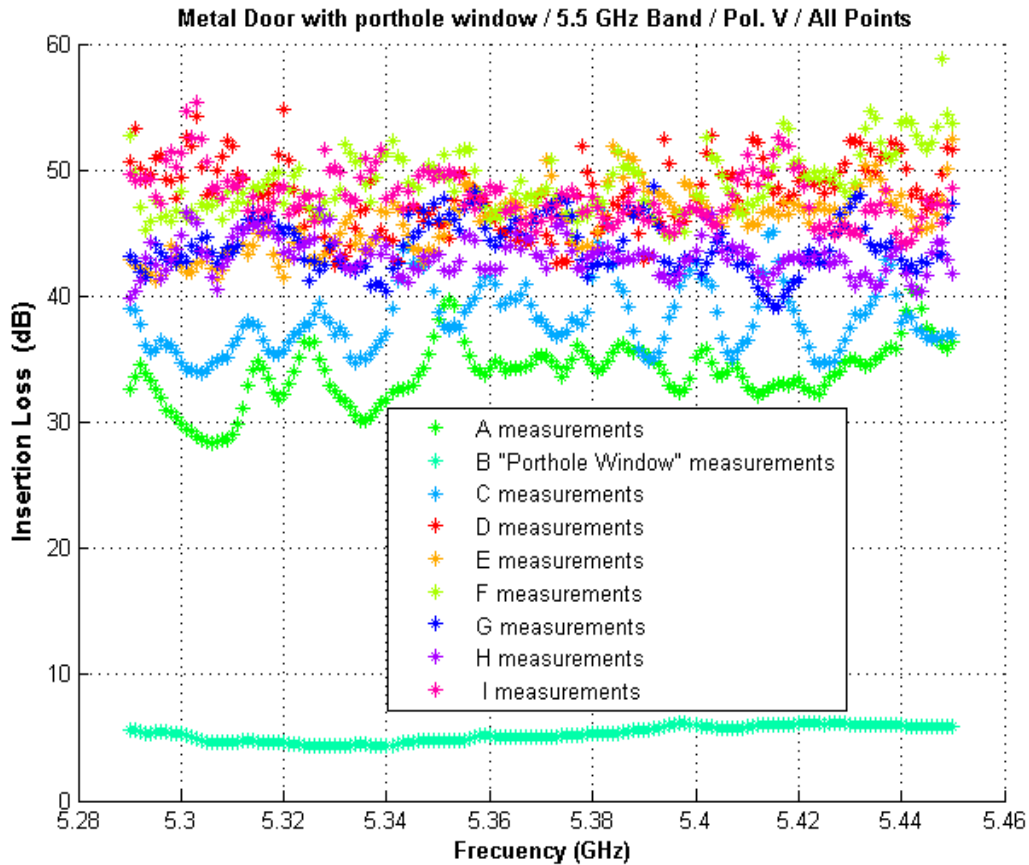


Figura 7.3.10: Medidas en la banda de 5.5 GHz con Polarización Vertical

▪ A continuación, vamos exponer el nivel de pérdidas de inserción que existe en cada punto, de tal manera que se extraigan conclusiones de forma muy visual respecto a lo que está ocurriendo en los diferentes puntos de interés y como afecta la ventana de buey a las diferentes zonas de la puerta metálica.

Cada una de las graficas representará todos los puntos en las diferentes bandas de trabajo así como también para cada una de las polarizaciones:

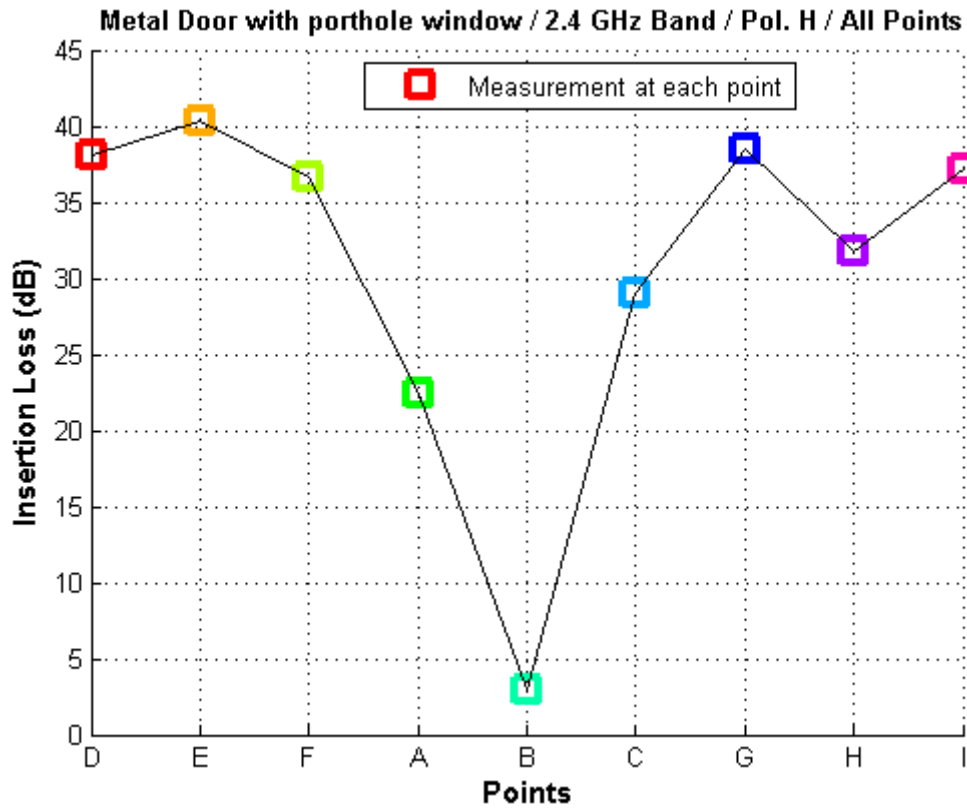


Figura 7.3.11: Nivel de pérdida en la banda de 2.4 GHz con Polarización Horizontal

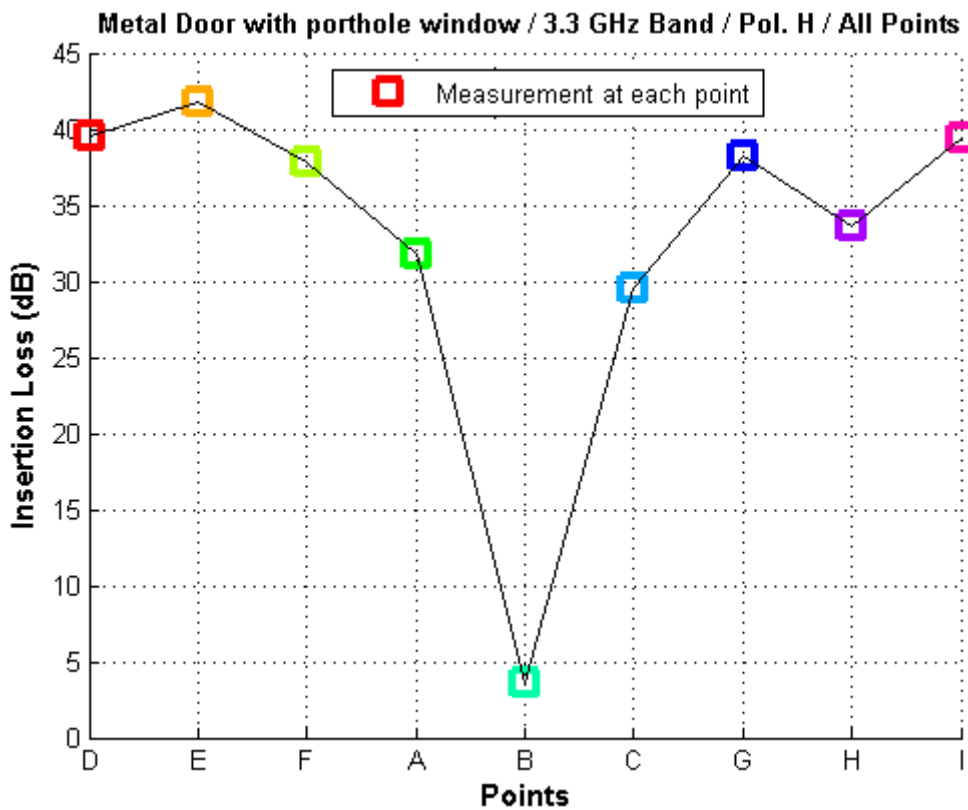


Figura 7.3.12: Nivel de pérdida en la banda de 3.3 GHz con Polarización Horizontal

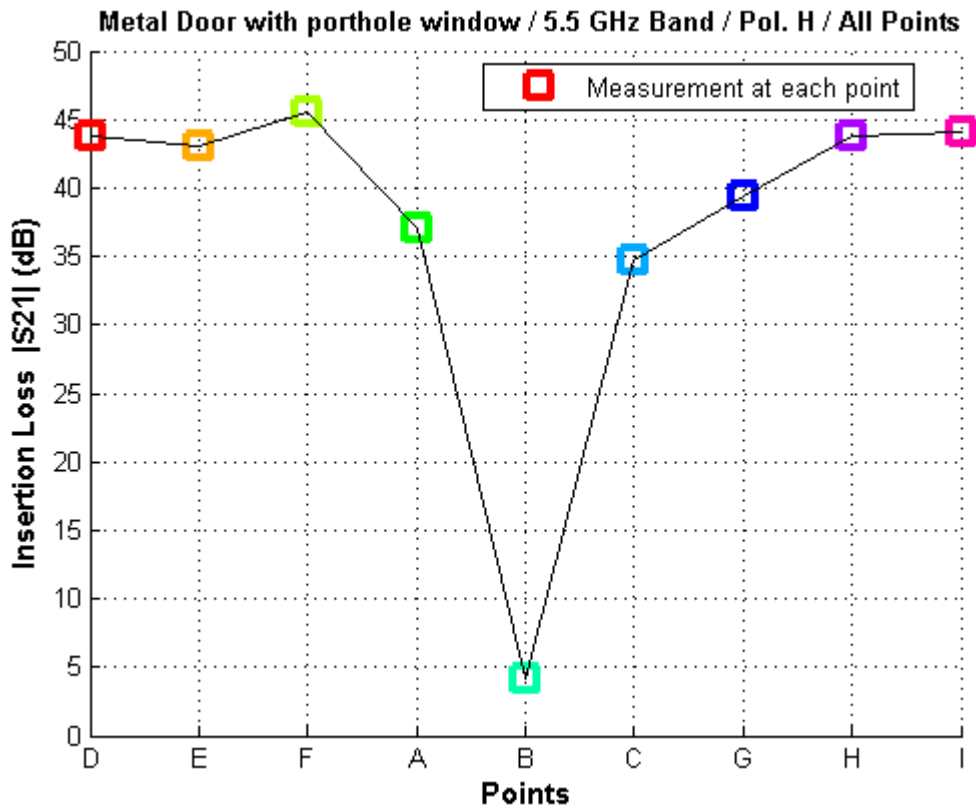


Figura 7.3.13: Nivel de pérdida en la banda de 5.5 GHz con Polarización Horizontal

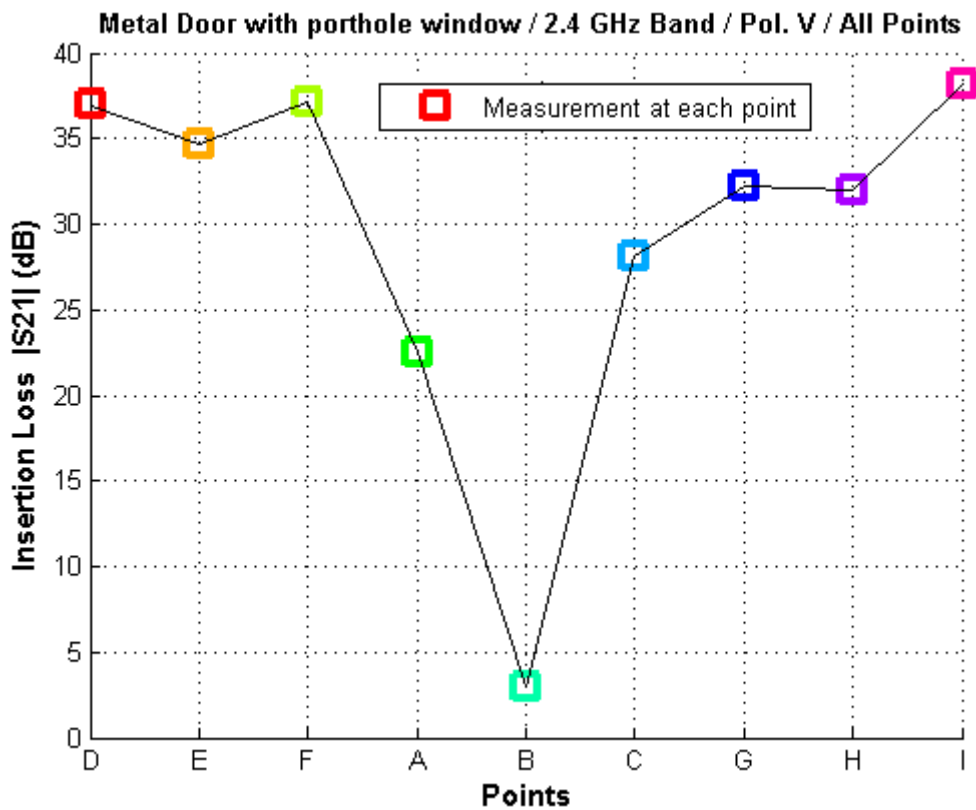


Figura 7.3.14: Nivel de pérdida en la banda de 2.4 GHz con Polarización Vertical

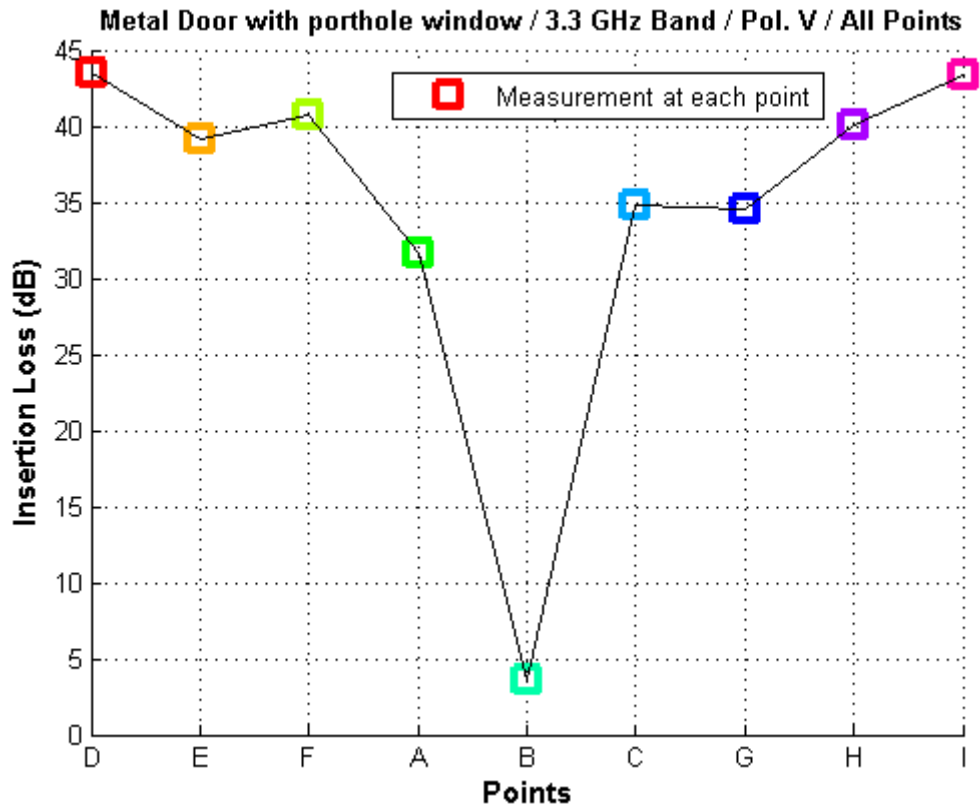


Figura 7.3.15: Nivel de pérdida en la banda de 3.3 GHz con Polarización Vertical

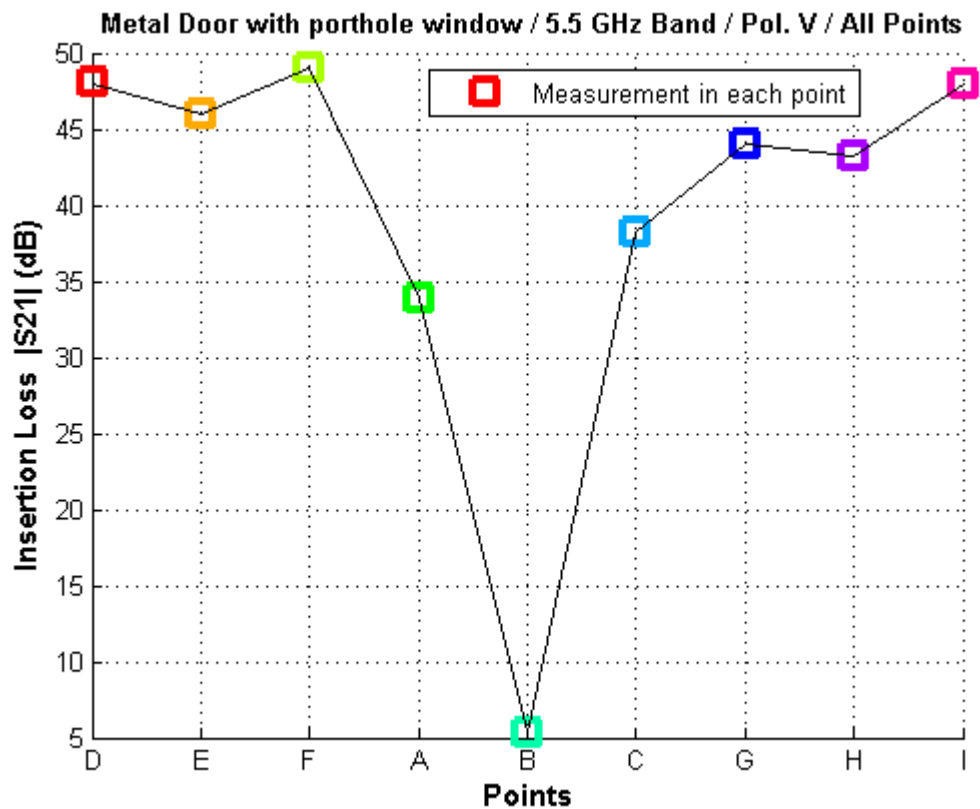


Figura 7.3.16: Nivel de pérdida en la banda de 5.5 GHz con Polarización Vertical

- Por último, una comparativa para las tres frecuencias en cada una de las polarizaciones:

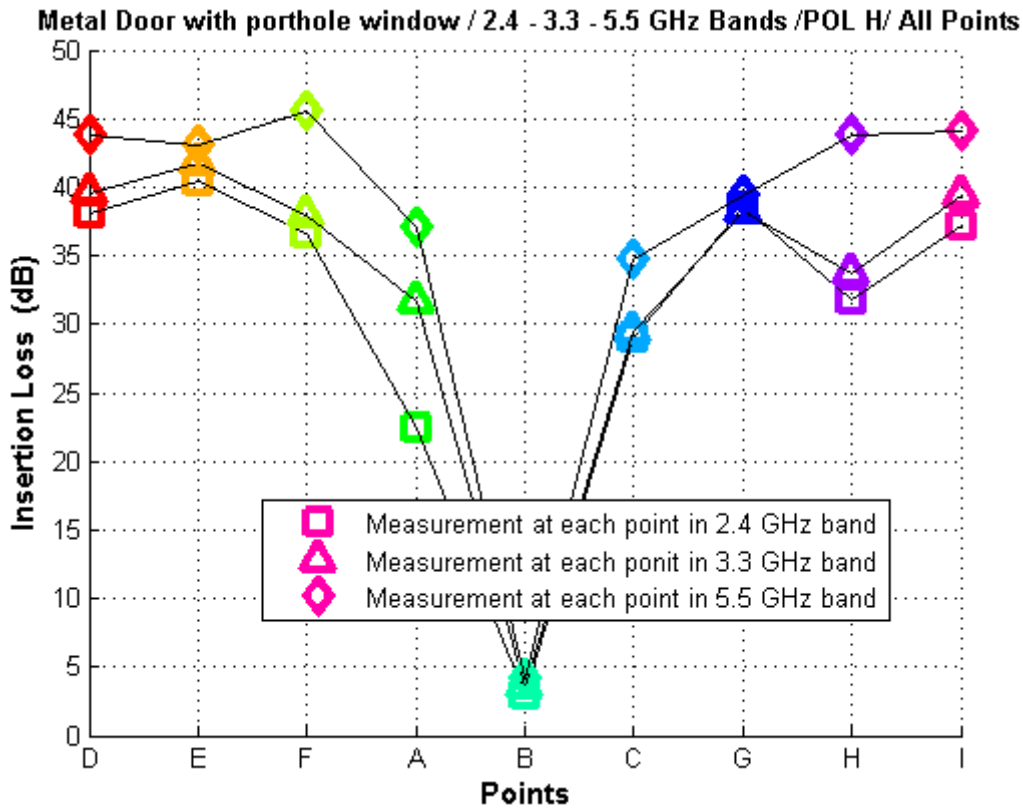


Figura 7.3.17: Nivel de pérdida en las tres bandas con Polarización Horizontal

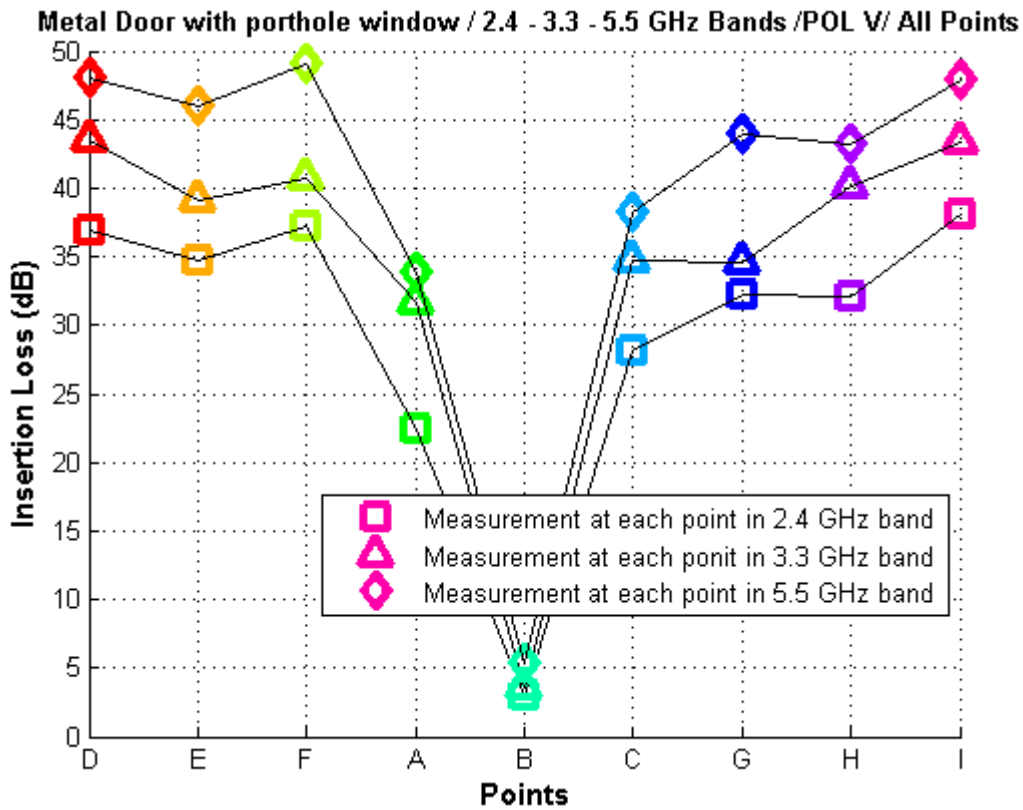


Figura 7.3.18: Nivel de pérdida en las tres bandas con Polarización Vertical

7.3.4 Conclusiones

En el caso de la puerta metálica con ventana de ojo de buey, se aprecia que las pérdidas en la posición del cristal son muy bajas, sin superar los 5 dB en la banda más alta utilizada de 5.5 GHz. Esto es obvio si realizamos una analogía con el primer escenario, y es que se trata de cristal, y como explicamos anteriormente, este tipo de material tiene muy bajas pérdidas de inserción, y más si es un cristal simple, como es este caso. Las pérdidas obtenidas en el punto de interés "B", donde se encuentra el cristal, son las siguientes:

- Para bandas de frecuencias situadas en 2.4 GHz las pérdidas de inserción producidas rondan los 3 dB.
- Para bandas de frecuencias situadas en 3.3 GHz las pérdidas de inserción producidas rondan los 4 dB.
- Para bandas de frecuencias situadas en 5.5 GHz las pérdidas de inserción producidas rondan los 5 dB.

En la literatura estas pérdidas deberían ser un poco más bajas, pero en este escenario no estamos realizando un estudio de un cristal simple con dimensiones grandes, sino que en este caso, tenemos dos factores a tener en cuenta, y es que alrededor de la ventana existe metal, y además esta ventana es pequeña, donde no todas las ondas en la propagación atravesaran el cristal.

En el resto de puntos, las pérdidas son muy altas, donde:

- Para bandas de frecuencias situadas en 2.4 GHz las pérdidas de inserción producidas en puntos lejanos a la ventana están entre 35-40 dB. Mientras que en puntos cercanos a la ventana las pérdidas rondan los 20-25 dB.
- Para bandas de frecuencias situadas en 3.3 GHz las pérdidas de inserción producidas en puntos lejanos a la ventana están entre 40-45 dB. Mientras que en puntos cercanos a la ventana las pérdidas rondan los 30-35 dB.
- Para bandas de frecuencias situadas en 5.5 GHz las pérdidas de inserción producidas en puntos lejanos a la ventana están entre 45-50 dB. Mientras que en puntos cercanos a la ventana las pérdidas rondan los 35-40 dB.

Estas pérdidas tan altas se deben al metal, el cual es un elemento muy absorbente de ondas electromagnéticas y con un alto índice de reflexión de los rayos incididos en él. Gran parte de la señal que llega en recepción será debida a la difracción en el cristal, y es que la ventana de ojo de buey, va a actuar como apertura para la señal en el radioenlace, donde se producirá mucha más difracción en los puntos de la puerta metálica que estén próximos a la ventana.

7.4 Escenario 4: Columna de ladrillo y hormigón

El cuarto escenario que vamos a caracterizar es una columna rectangular de ladrillo con hormigón en su interior, situada en el soportal de una urbanización del barrio de Montecarmelo, en Madrid.

7.4.1 Estructura, dimensiones y puntos de análisis



Figura 7.4.1 y 7.4.2: Diferentes vistas de la columna de ladrillo y hormigón

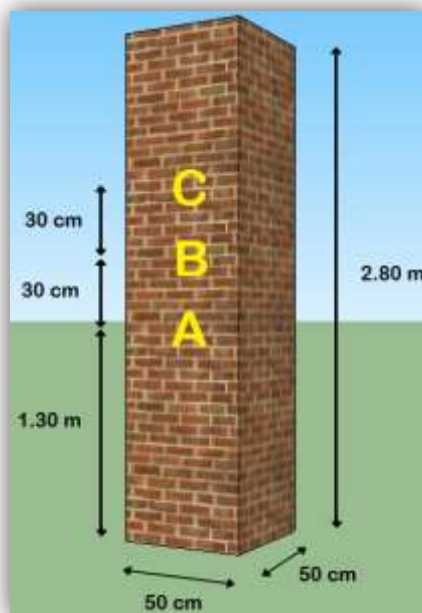


Figura 7.4.3: Dimensiones y puntos de análisis del escenario

7.4.2 Teoría aplicada: Modelización de la estructura

En este escenario se encuentra como obstáculo una columna rectangular. Este tipo de material es muy parecido al del escenario 2 (muro de ladrillo), por lo que, en un principio, las pérdidas de penetración del material serán bastante similares al caso anterior. Sin embargo este escenario no tiene gran dimensión como si la tenía el muro, es un obstáculo más bien estrecho donde no se pueden elegir puntos de interés de tal manera que no se vean afectados por algún otro fenómeno que no sea meramente la penetración de la señal en el material.

Por tanto vamos a realizar un análisis del escenario explicando los efectos teóricos que se producen en la señal, y afectan a las pérdidas de inserción del obstáculo:

- **Difracción:** Al ser una columna rectangular estrecha, en los laterales de la columna parte de la señal se va a ver difractada. Como explicamos en el “Capítulo 3”, en el tema de difracción, la señal va a “doblar esquinas” de la columna, donde la señal total recibida será una suma de la penetrada mas todas las señales difractadas.

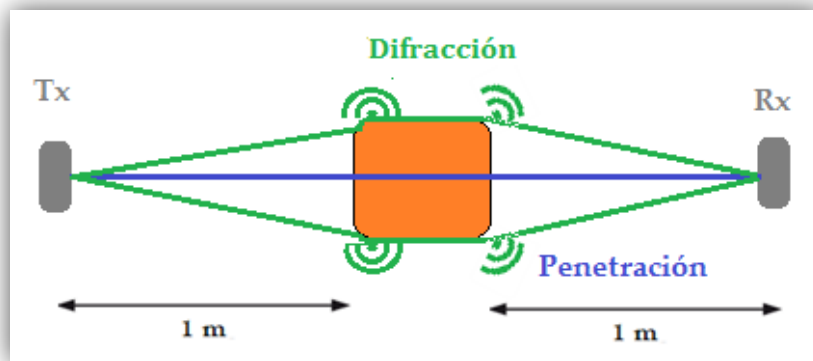


Figura 7.4.4: Difracción es las esquinas de la columna

- **Distancia:** La colocación de las antenas con respecto al obstáculo es vital para una buena caracterización del escenario, donde, dependiendo de esta situación de la recepción con respecto a la columna, llegarán los rayos transmitidos difractados en diferente proporción a la antena receptora situada detrás de la columna.

En nuestro caso, para ver este efecto, hemos situado la antena receptora a otra distancia que no fuese un metro, es decir, hemos reducido la distancia a la mitad con respecto al obstáculo. Es intuitivo, que cuanto más pegada este la antena receptora a la columna, la cantidad de rayos difractados será menor, ya que a estos no les dará tiempo a doblar la esquina y por lo tanto llegar a la recepción.

Esto supone, por tanto, más pérdidas en la señal, ya que la contribución de señal que podrían dar estos rayos difractados, sería mucho menor.

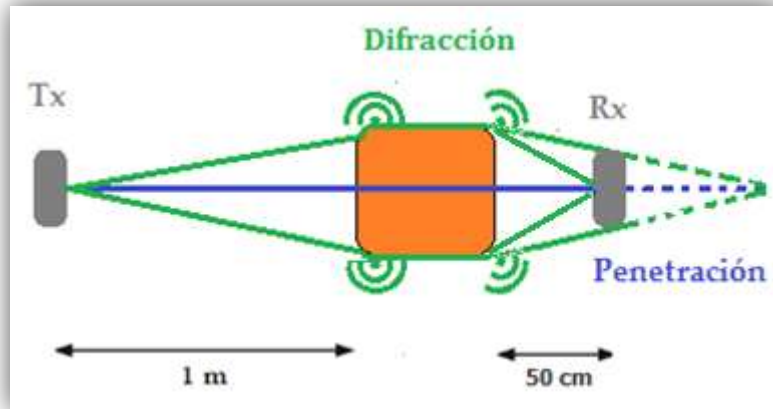


Figura 7.4.5: Consecuencia del cambio de distancia en recepción con respecto al obstáculo

- **Reflexión:** La elección de los puntos de interés se ha hecho teniendo solo en cuenta la reflexión que podría ocurrir en los rayos emitidos al chocar con el suelo o con el techo del soportal. Por ello los puntos de medición están concentrados en la mitad de la columna, manteniendo cierta distancia con respecto a la base y el techo donde termina la columna.

7.4.3 Resultados y análisis del escenario

- A continuación vamos exponer las pérdidas de inserción que hemos obtenido para los diferentes puntos: A, B, C para cada banda de frecuencia y para los dos tipos de polarización, horizontal y vertical, que poseen nuestras antenas. Además de todo ello, también señalaremos las diferencias que existen respecto al cambio de distancia en la recepción respecto al obstáculo.

A partir de todos estos datos, hemos representado en diferentes tipos de graficas las pérdidas de inserción obtenidas. En primer lugar vamos exponer las medidas en cada punto de análisis y para cada una de las frecuencias y también para cada tipo de polarización, comparando la distancia de un metro de recepción y la distancia de medio metro en la recepción.

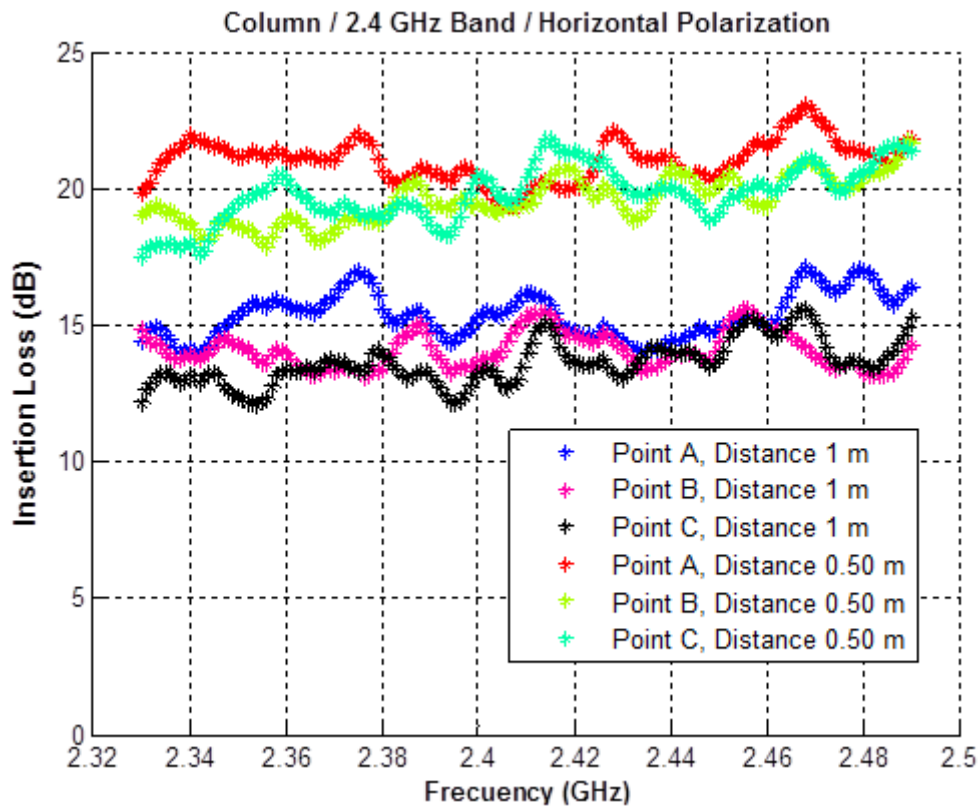


Figura 7.4.6: Medidas en la banda de 2.4 GHz con Polarización Horizontal

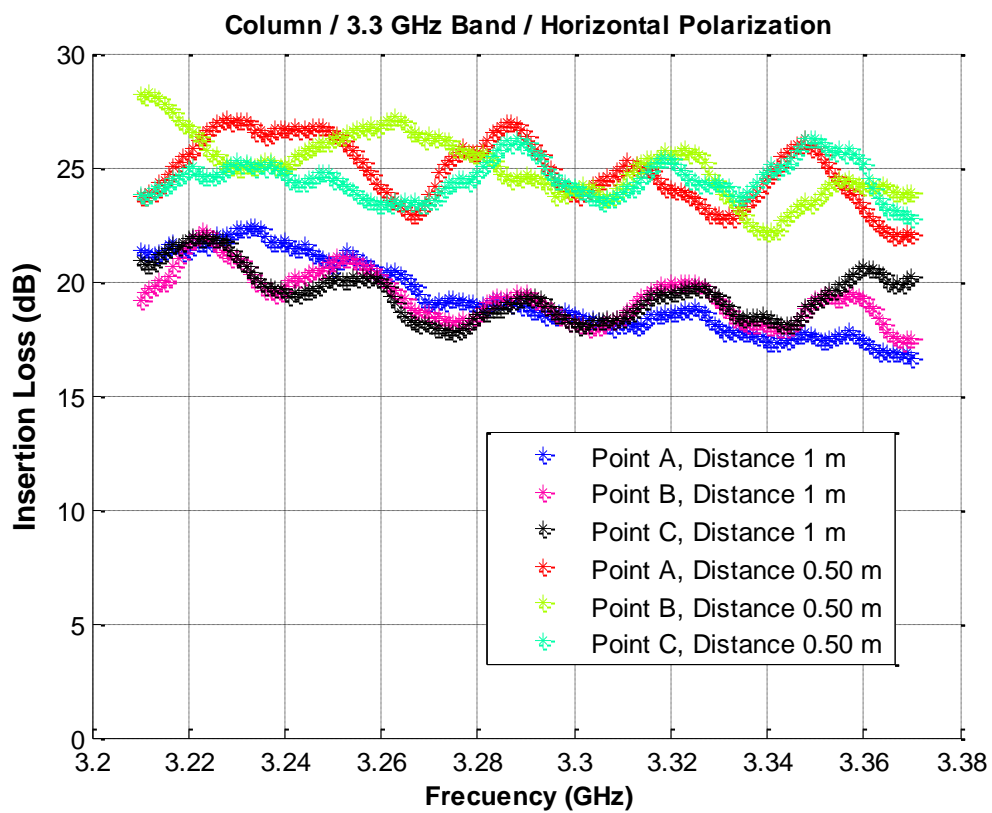


Figura 7.4.7: Medidas en la banda de 3.3 GHz con Polarización Horizontal

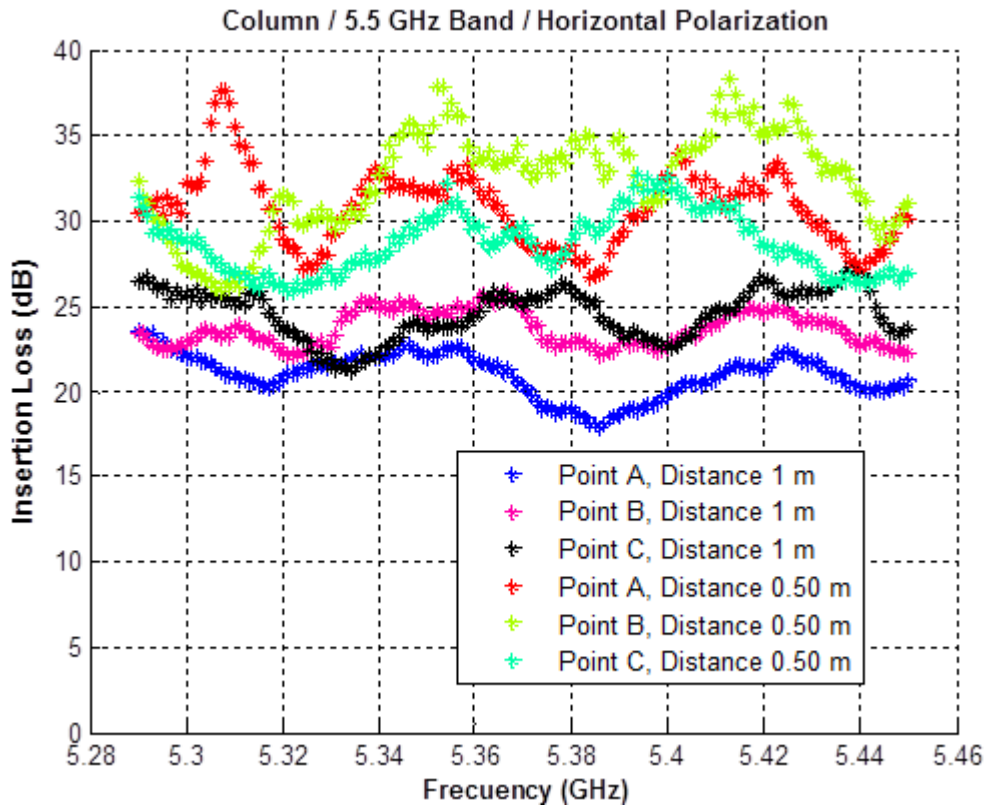


Figura 7.4.8: Medidas en la banda de 5.5 GHz con Polarización Horizontal

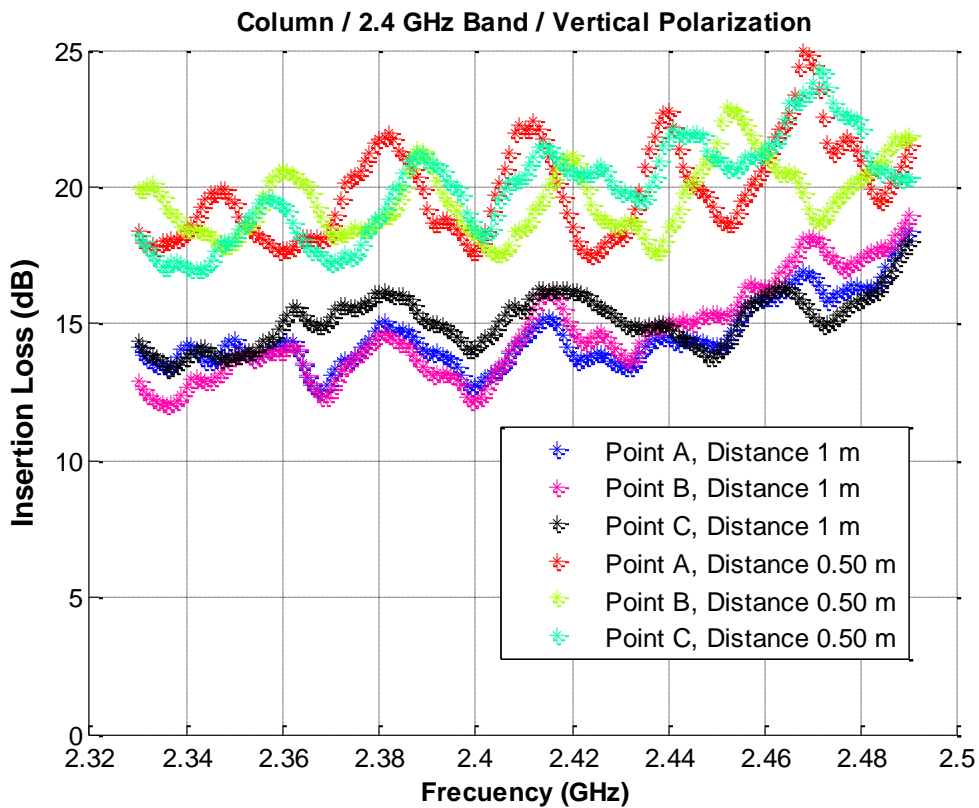


Figura 7.4.9: Medidas en la banda de 2.4 GHz con Polarización Vertical

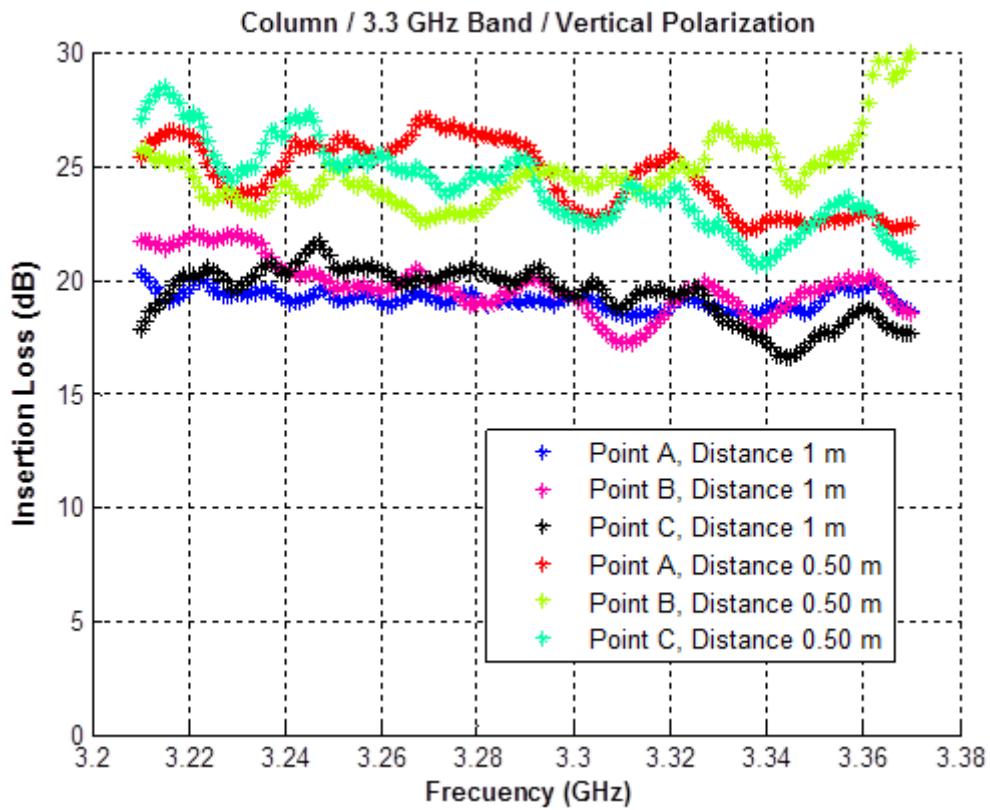


Figura 7.4.10: Medidas en la banda de 3.3 GHz con Polarización Vertical

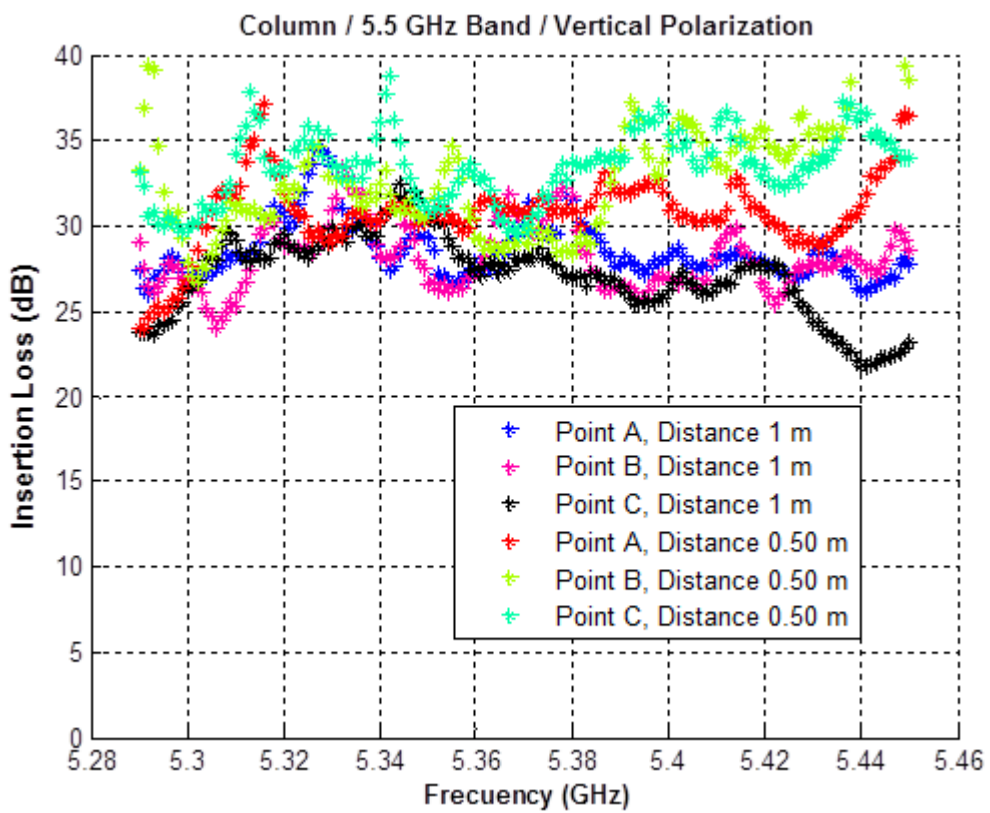


Figura 7.4.11: Medidas en la banda de 5.5 GHz con Polarización Vertical

- A continuación vamos a exponer de forma más visual, el nivel de pérdidas de inserción (eje x) en cada punto de interés A, B, C (eje y), es decir a las diferentes alturas, comparando las diferentes bandas de frecuencias utilizadas y las diferentes distancias que tiene la antena receptora en el radio enlace.

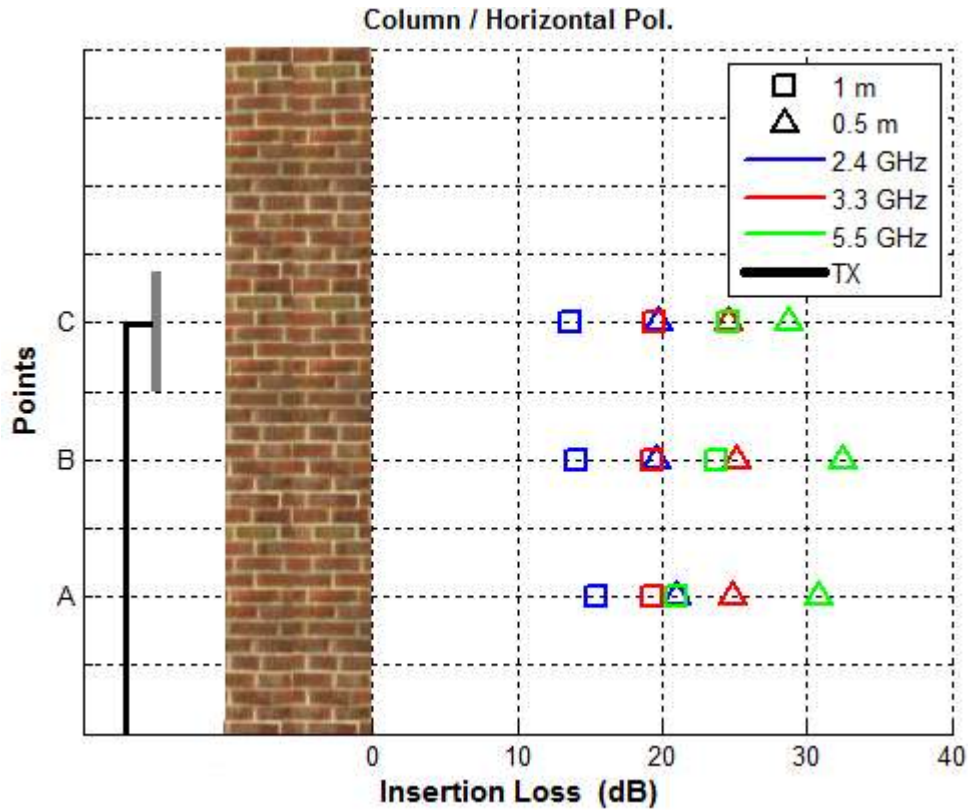


Figura 7.4.12: Medidas en las tres bandas con Polarización Horizontal

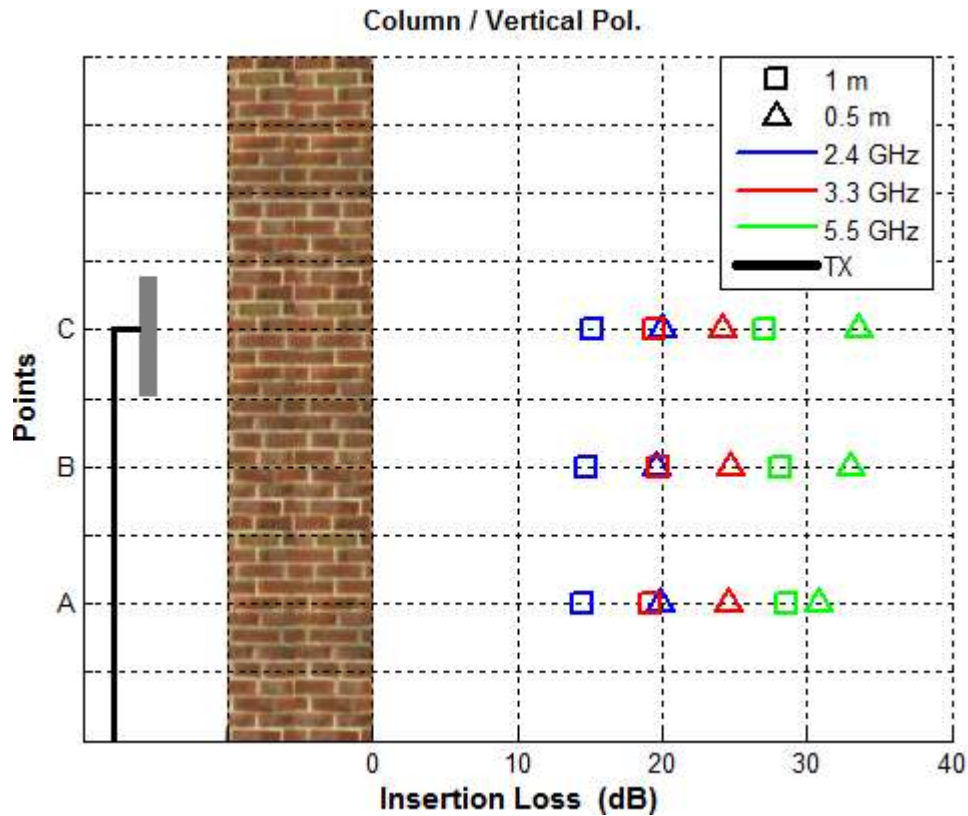


Figura 7.4.13: Medidas en las tres bandas con Polarización Vertical

- Por último vamos a representar todos los datos obtenidos de forma que se observe claramente el efecto que produce el cambio de distancias en recepción

En este caso el nivel de pérdidas de inserción se encuentra en el eje y, donde las distancias empleadas en la caracterización del escenario vienen dadas por el eje x. Se compara cada punto de interés así como también las diferentes bandas de frecuencias utilizadas.

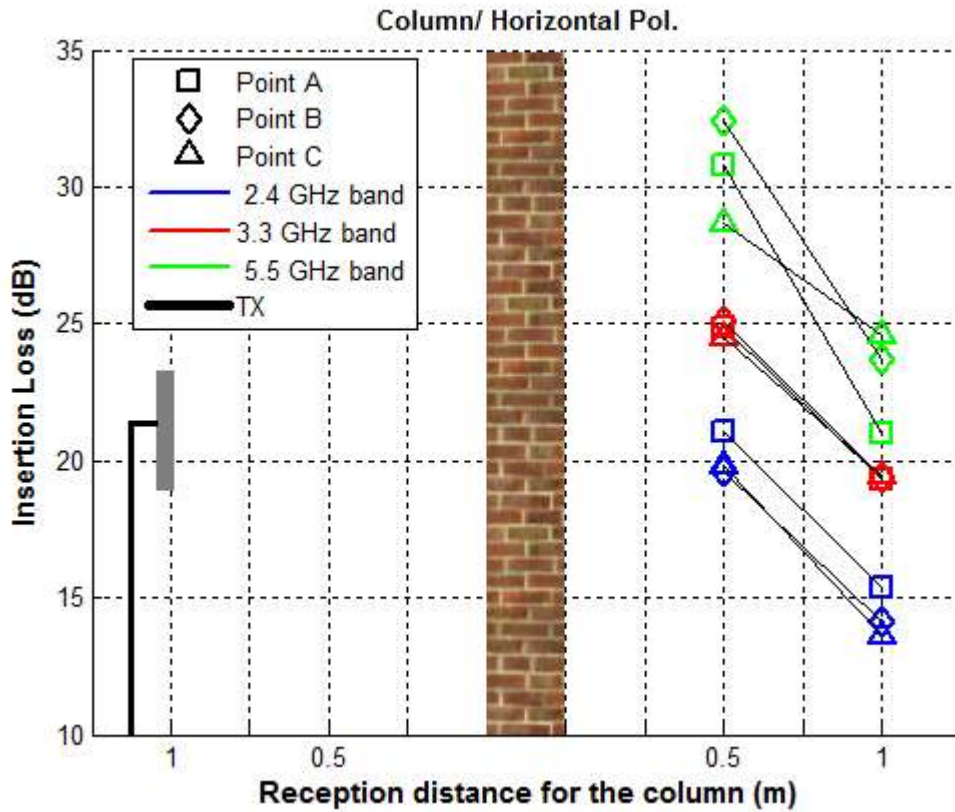


Figura 7.4.14: Medidas en cada punto en las tres bandas con Polarización Horizontal

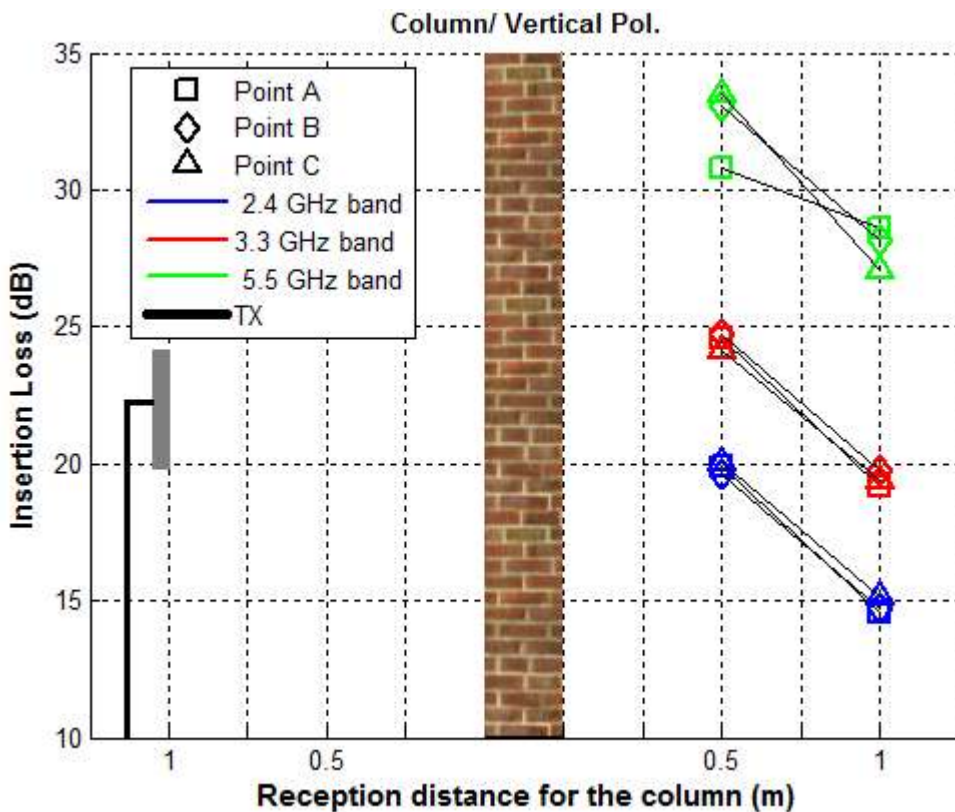


Figura 7.4.15: Medidas en cada punto en las tres bandas con Polarización Vertical

7.4.4 Conclusiones

En el escenario se encuentra como obstáculo la columna rectangular de ladrillo y hormigón, por lo que, en un principio, las pérdidas de penetración del material serán bastante similares al caso anterior. Pero los datos obtenidos nos dicen lo contrario, y esto se debe en gran medida a la dimensión que tiene este obstáculo, es decir es muy estrecha, respecto al muro anteriormente caracterizado. Esto va a suponer que el fenómeno de difracción sea claramente señalarse, y por tanto, tome una gran importancia a la hora de analizar el escenario. Donde la señal va a “doblar esquinas” en la columna, y esto supondrá efectos destacables en la señal principal que atraviesa el material.

Dependiendo de la distancia en la recepción con respecto a la columna, los rayos difractados llegan en diferente proporción a la antena receptora. Y es que cuando la antena receptora está muy cerca de la columna no todos los rayos difractados llegan a la recepción y por tanto todas esas contribuciones de los rayos difractados hacia la señal principal serán darán en menor cantidad que cuando se utiliza mas distancia de separación, y por tanto habrá más pérdidas de inserción.

Los datos obtenidos que verifican estos efectos son los siguientes:

- Para bandas de frecuencias situadas en 2.4 GHz las pérdidas de inserción producidas para una distancia de recepción de 1 metro rondan los 15 dB, mientras que para medio metro en recepción rondan los 20 dB.
- Para bandas de frecuencias situadas en 3.3 GHz las pérdidas de inserción producidas para una distancia de recepción de 1 metro rondan los 20 dB, mientras que para medio metro en recepción rondan los 24 dB.
- Para bandas de frecuencias situadas en 5.5 GHz las pérdidas de inserción producidas para una distancia de recepción de 1 metro rondan los 28 dB, mientras que para medio metro en recepción rondan los 32 dB.

- En cuanto a la utilización de las dos polarizaciones horizontal y vertical, hay que destacar que los resultados obtenidos varían, pero no de forma muy significativa.

7.5 Escenario 5: Rejilla de metal

El quinto escenario que vamos a caracterizar es una rejilla de metal geométrica con aperturas cuadradas, situada en el exterior del “Edificio C” en Escuela Politécnica Superior de la Universidad Autónoma de Madrid.

7.5.1 Estructura, dimensiones y puntos de análisis



Figura 7.5.1 y 7.5.2: Diferentes vistas de la rejilla de metal

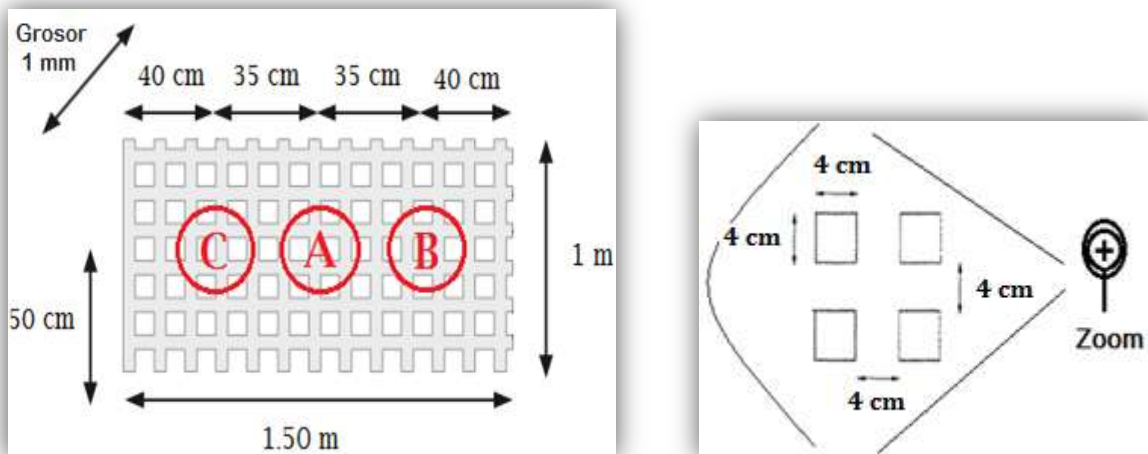


Figura 7.5.3 y 7.5.4: Dimensiones y puntos de análisis del escenario

7.5.2 Teoría aplicada: Modelización de la estructura

En la literatura se han desarrollado expresiones de forma cerrada para las aberturas en un plano metálico o para parches metálicos infinitos en un plano sin pérdidas o sin dieléctrico de espesor casi nulo traduciéndolas a un circuito equivalente de impedancias agrupadas. En nuestro caso, al ser de aberturas, el circuito como línea de transmisión sería el siguiente:

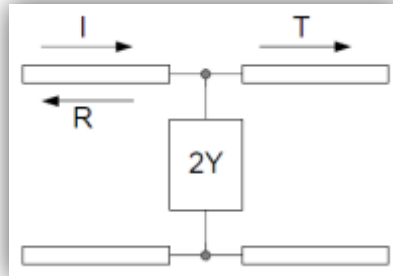


Figura 7.5.5: Línea de transmisión modelada para FSS inductivos

Por tanto esta modelización utilizando el método de la línea de transmisión, relaciona la red de aberturas en el plano metálico o red de parches metálicos como inductancias agrupadas o capacitancias agrupadas, y por lo tanto, hablamos de filtros de malla inductiva o capacitiva respectivamente. Deducimos, por tanto, que nuestra estructura a analizar será inductiva. [17][18]

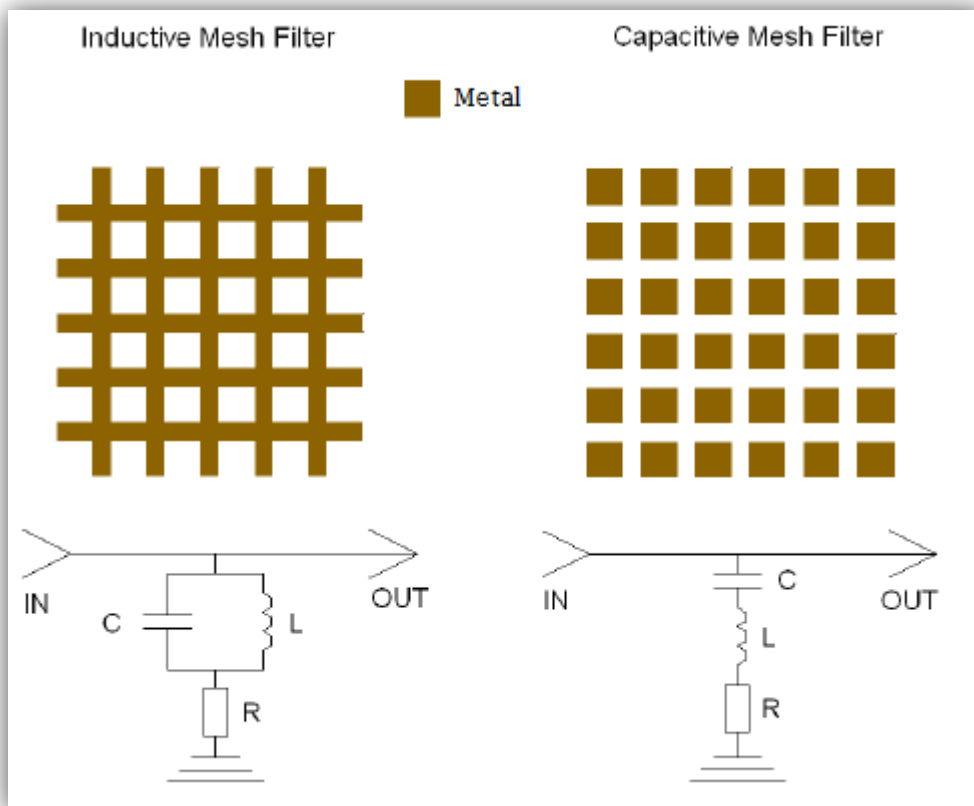


Figura 7.5.6: Circuitos equivalentes con respecto a las estructuras

Los coeficientes de reflexión y transmisión de este circuito pueden ser calculados a partir de la teoría simple de líneas de transmisión que se aplica tanto a la red inductiva como a la capacitiva:

$$T = \frac{1}{1 + Y}$$
$$R = \frac{-1}{1 + (1/Y)} = T - 1$$

Las relaciones entre los coeficientes de transmisión y reflexión de la rejilla y los elementos del parche se puede obtener de principio de Babinet [19] y son dados por:

$$T_{cap} = -R_{ind} \text{ and } R_{cap} = -T_{ind}$$

Cuando el filtro es infinitamente fino y no hay dieléctricos (sin pérdidas), y los parches rectangulares o las aberturas, tienen las mismas dimensiones y periodicidad, los dos filtros son complementarios el uno con el otro. Si la estructura metálica de los filtros supone que es perfectamente conductora, entonces el principio de Babinet nos asegura que el perfil de reflexión de los FSS capacitivos será idéntico al perfil de transmisión de los FSS inductivos, de tal manera que:

$$T_{cap} = 1 - T_{ind}$$

- Superficies selectivas en frecuencia (FSS)

Las superficies selectivas de frecuencia (FSS) son estructuras periódicas en uno o dos dimensiones (es decir, simple o doble estructuras periódicas) que realizan una operación de filtrado. Así, dependiendo de su construcción física material, y la geometría, se pueden dividir en FSS con características de filtros paso bajo, paso alto, paso banda o banda eliminada.

Una lámina conductora perforada con aberturas periódicas o una red de parches periódicos metálicos constituye una superficie selectiva de frecuencia FSS para las ondas electromagnéticas transmitidas. La primera geometría, red de aberturas o rejillas, se puede modelar como un FSS inductivo, el cual funciona de manera similar a un filtro de paso alto. El segundo caso, red de parches metálicos, se modelan como FSS capacitivos, los cuales son similares a las características de un filtro de paso bajo.

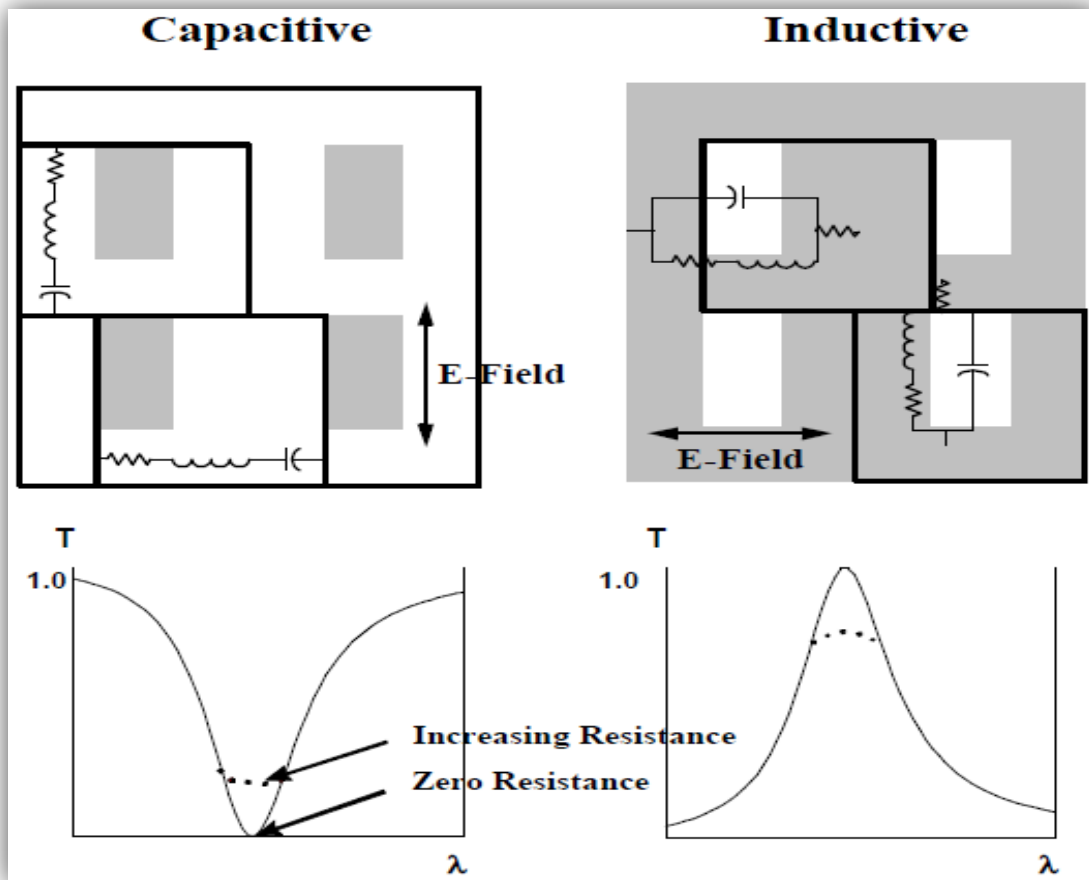


Figura 7.5.7: Transmitancia de los filtros equivalentes para cada estructura

Si los elementos son periódicos en un FSS entonces podrían poseer características de resonancia. Los FSS inductivos tendrán máxima transmisión en longitudes de onda cercanas a la longitud de onda de resonancia, mientras que en los FSS capacitivos inductivos tendrán máxima reflexión en longitudes de onda cercanas a la longitud de onda de resonancia.

Gracias a esta característica de resonancia, podríamos modelar estos filtros como filtros paso banda o filtros banda eliminada, donde cerca de la frecuencia a la que resuena, cierto ancho de banda de la señal, podría ser aceptado o rechazado. [20] [21]

Normalmente los filtros paso banda pueden ser realizados con rejillas inductivas sin embargo las redes capacitivas pueden ser aplicados para que posean características de la banda eliminada.

Un ejemplo aclarativo extraído de la literatura es el siguiente:

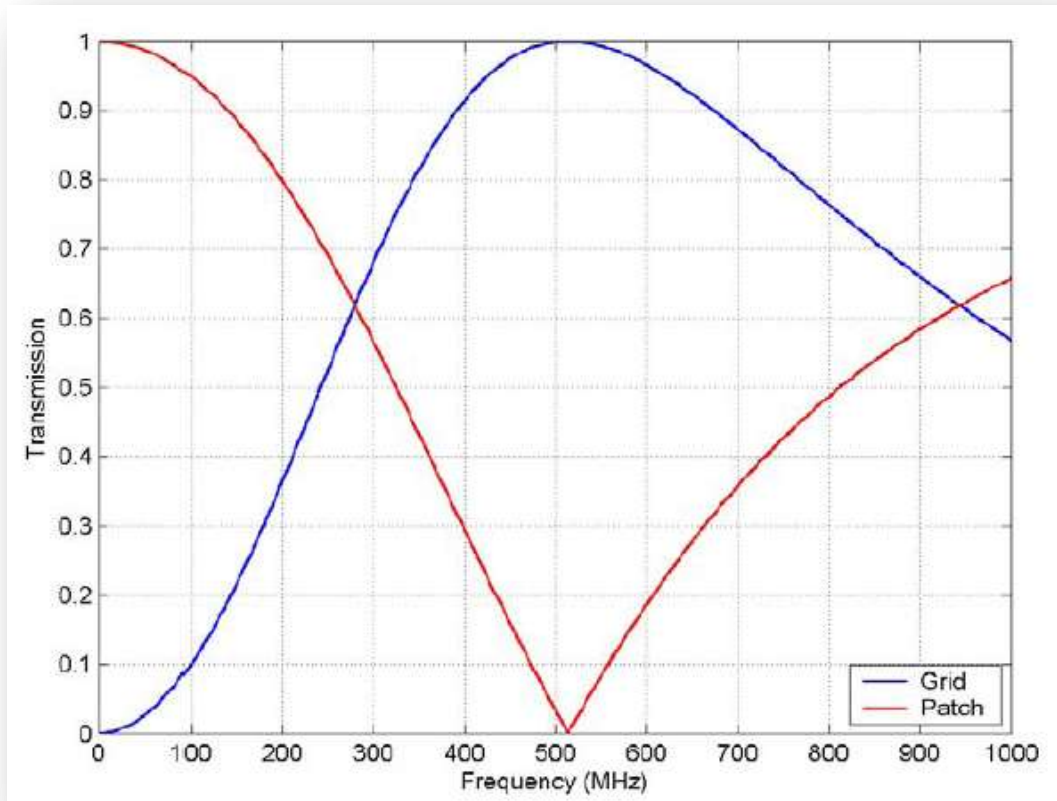


Figura 7.5.8: Ejemplo de transmitancia para parches metálicos y aperturas en plano metálico

7.5.3 Resultados y análisis del escenario

- A continuación vamos exponer la media y la desviación estándar de las pérdidas de inserción que hemos obtenido en la rejilla en los diferentes puntos: A, B, C para las tres bandas de frecuencia y para las polarizaciones horizontal y vertical, que poseen nuestras antenas. Se han incluido en las medidas de este escenario diferentes distancias de medición donde la antena transmisora toma tres posiciones diferentes con respecto al obstáculo: 0.80 metros, 1 metro y 1,20 metros.

Lo que se pretende en este primer apartado de representaciones es observar que tipo de filtro está representando nuestra rejilla en cuestión y observar si posee algún tipo de frecuencia de resonancia.

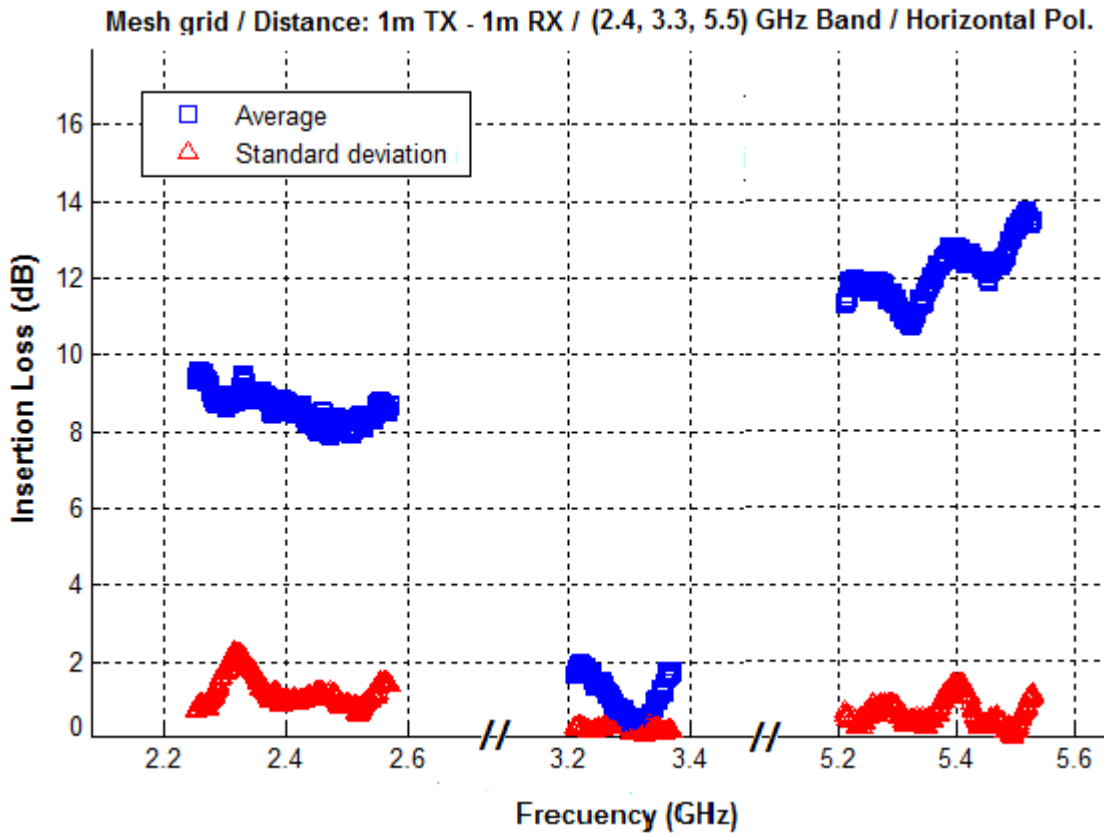


Figura 7.5.9: Media y desviación en Polarización Horizontal a 1 metro de transmisión

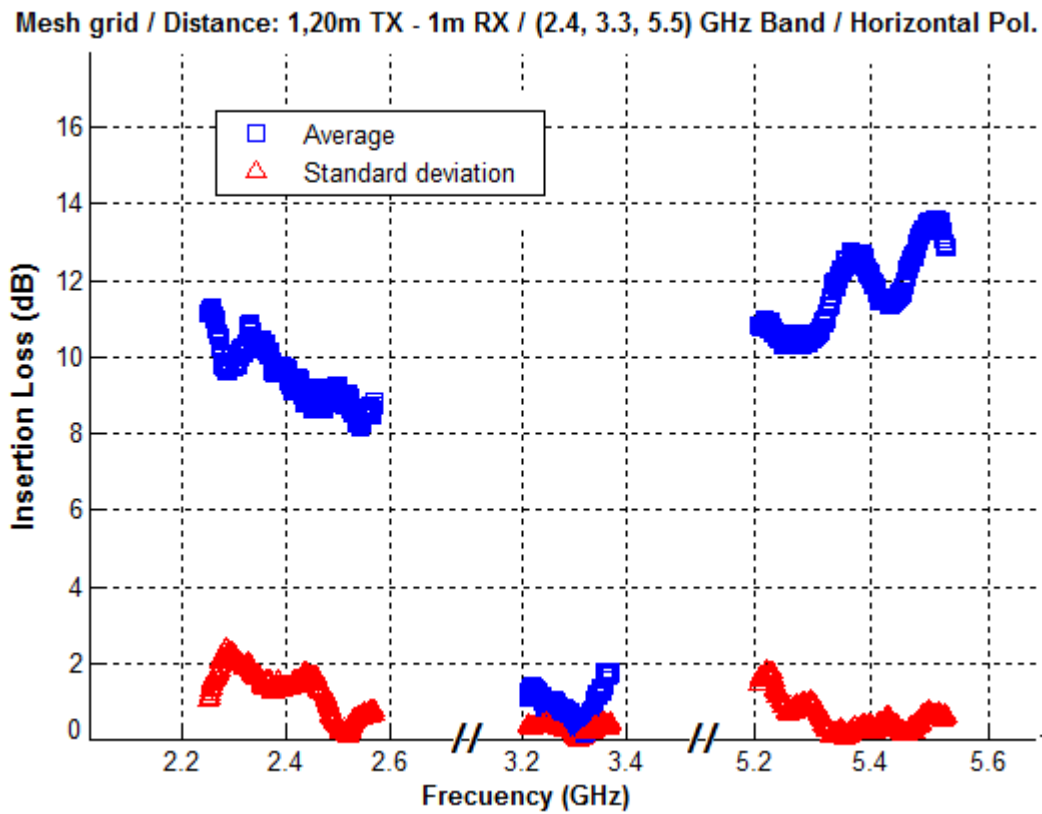


Figura 7.5.10: Media y desviación en Polarización Horizontal a 1.20 metros de transmisión

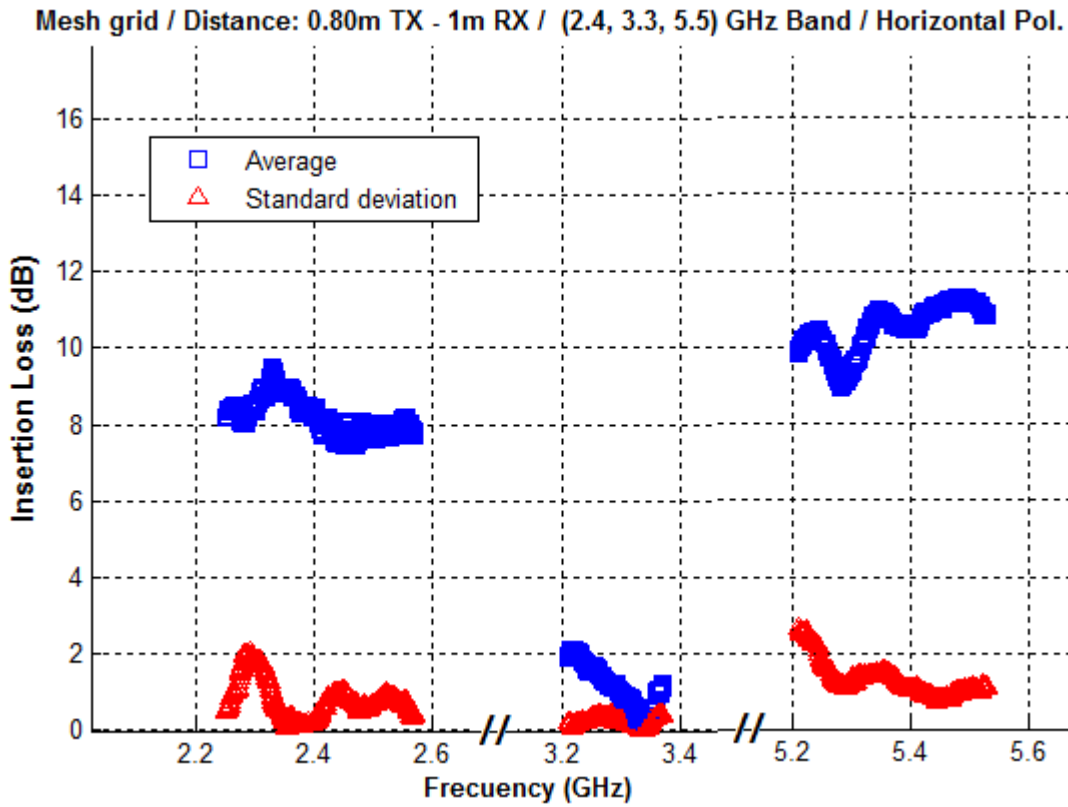


Figura 7.5.11: Media y desviación en Polarización Horizontal a 0.80 metros de transmisión

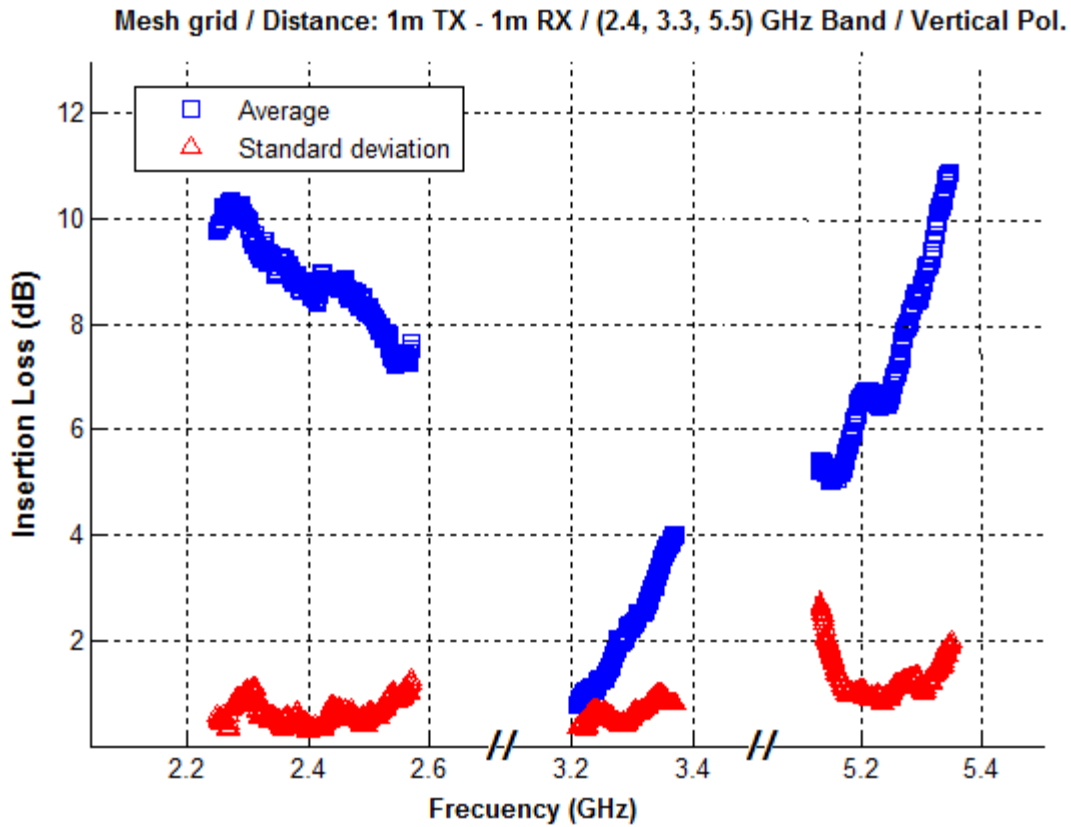


Figura 7.5.12: Media y desviación en Polarización Vertical a 1 metro de transmisión

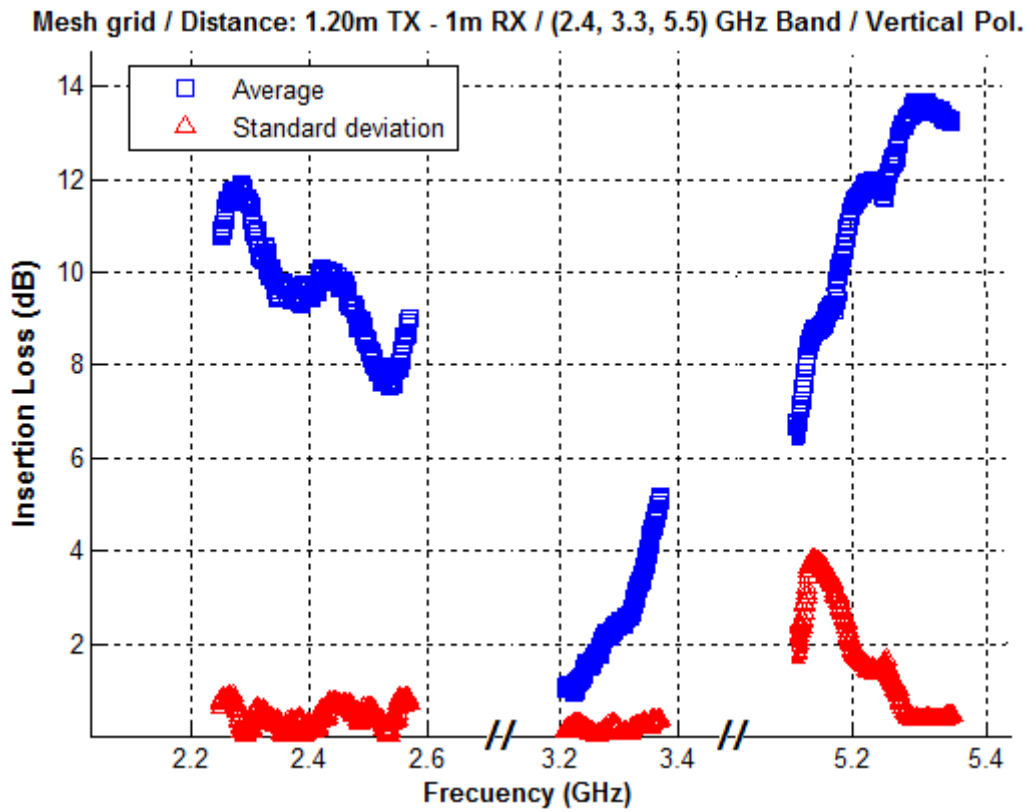


Figura 7.5.13: Media y desviación en Polarización Vertical a 1.20 metros de transmisión

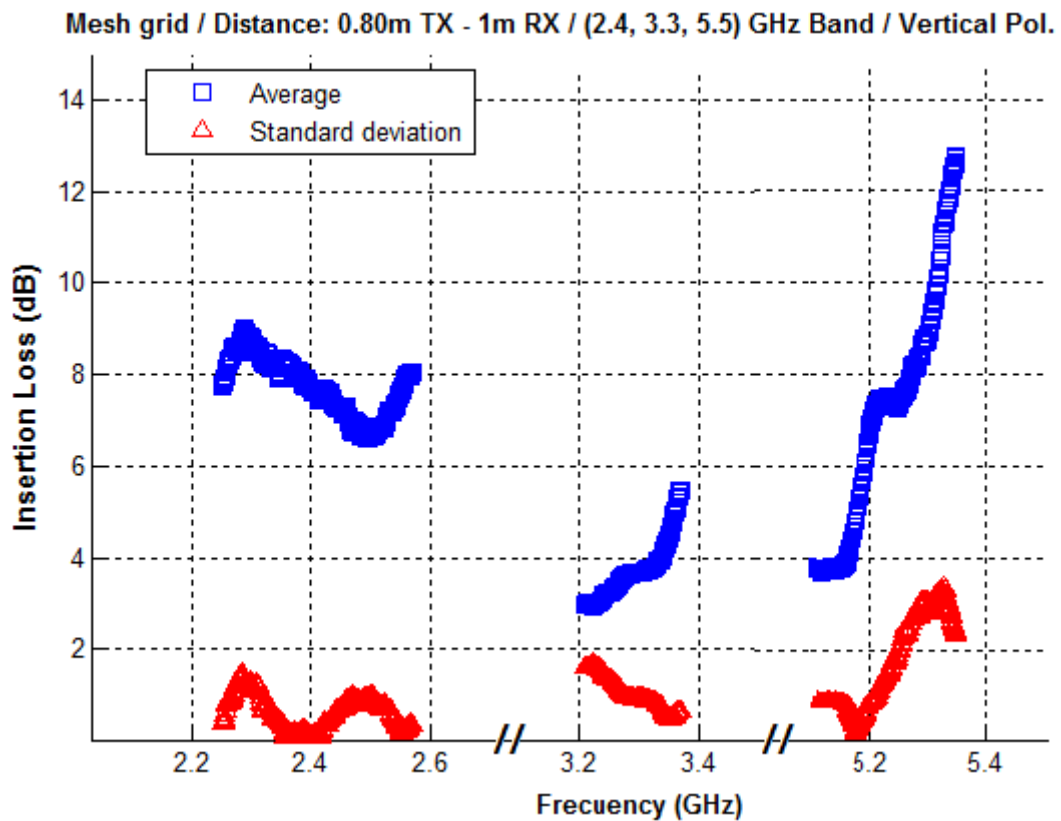


Figura 7.5.14: Media y desviación en Polarización Vertical a 0.80 metros de transmisión

- A continuación vamos exponer las diferencias que existen entre las polarizaciones cuando se manejan diferentes distancias de transmisión y se mantiene el punto de interés. Para no sobrecargar el proyecto indicaremos como ejemplo graficas para 2.4 GHz:

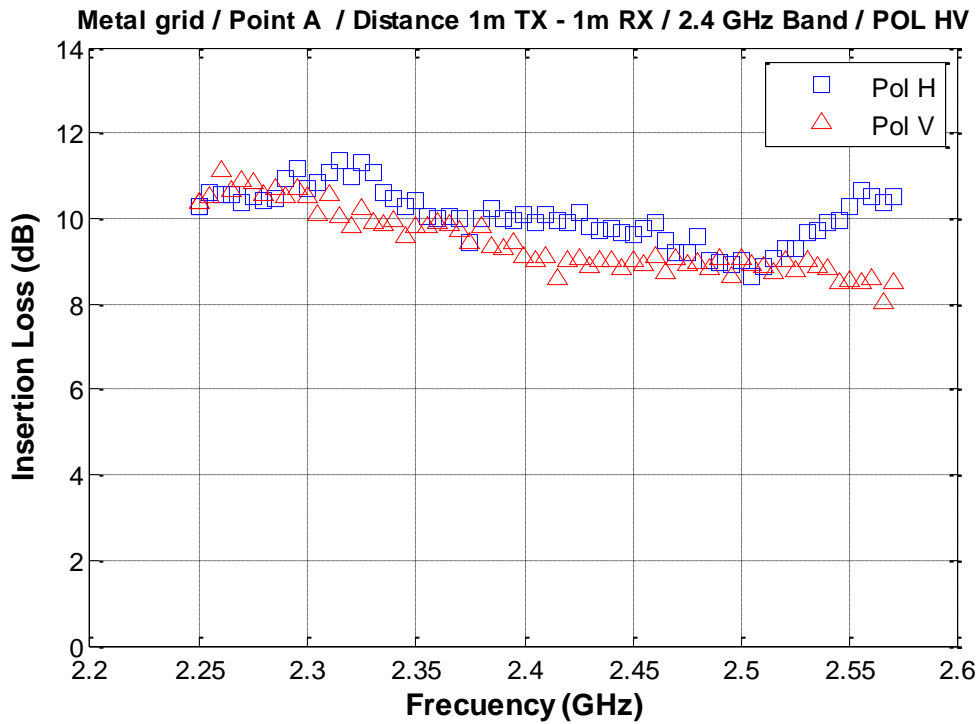


Figura 7.5.15: Medida en 2.4 GHz en el “Punto A” a 1 metro de transmisión

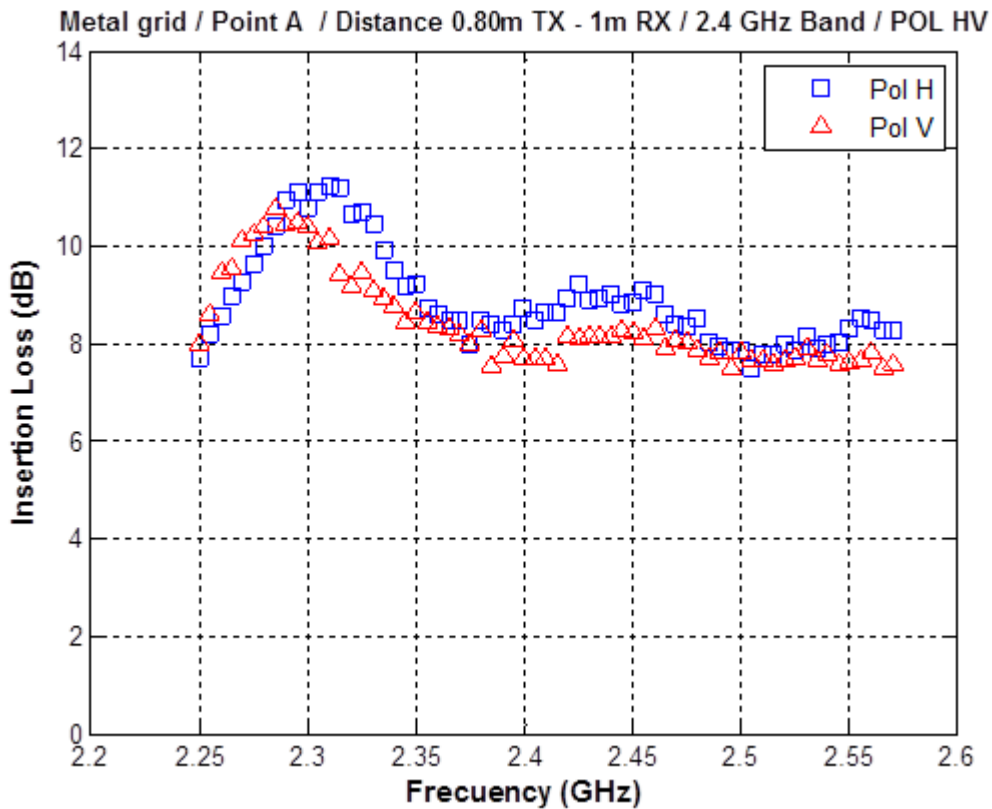


Figura 7.5.16: Medida en 2.4 GHz en el “Punto A” a 0.80 metros de transmisión

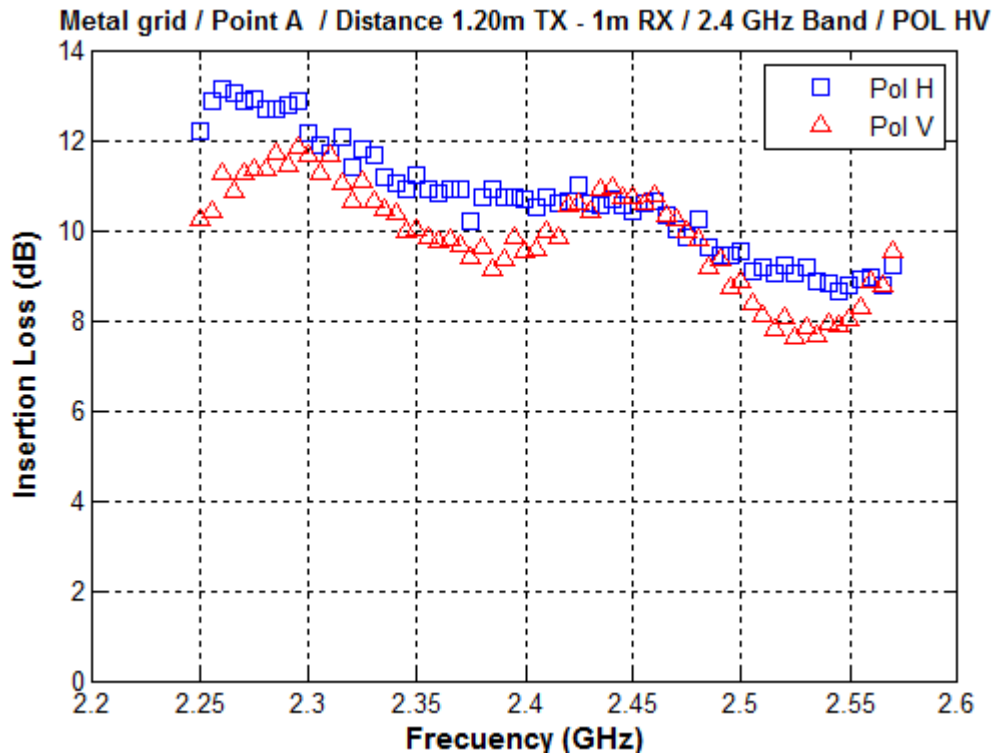


Figura 7.5.17: Medida en 2.4 GHz en el “Punto A” a 1.20 metros de transmisión

- A continuación vamos exponer las diferencias que existen entre las polarizaciones cuando se manejan diferentes puntos de interés y se mantienen las distancias de transmisión.

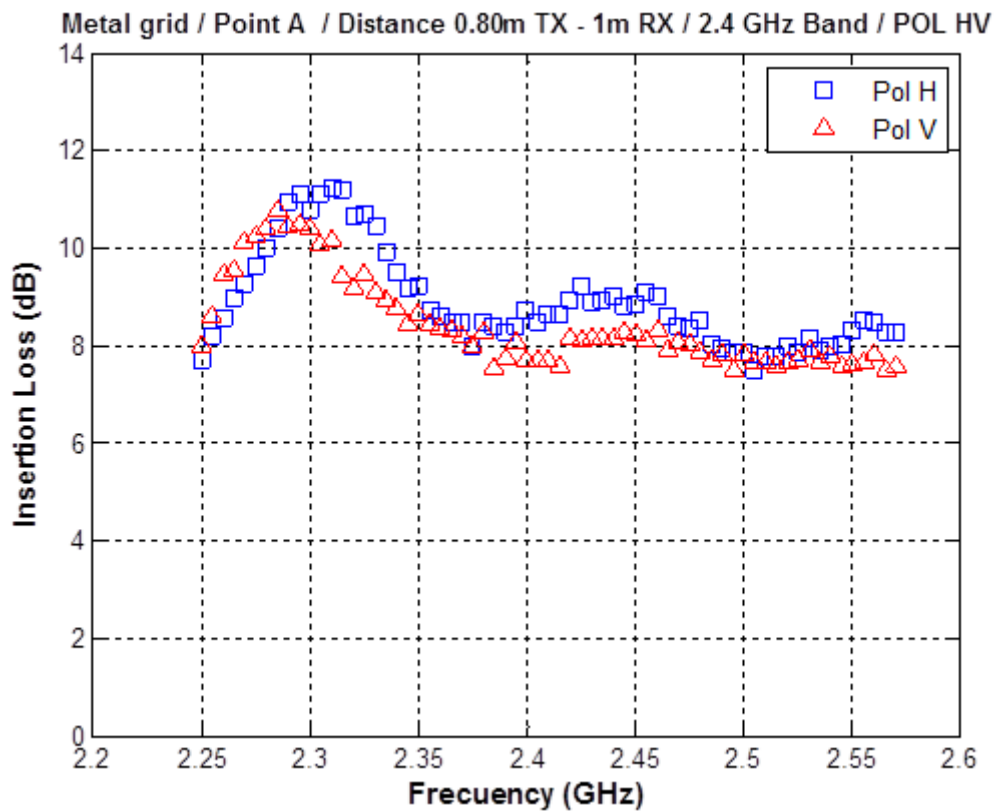


Figura 7.5.18: Medida en 2.4 GHz en el “Punto A” a 0.80 metros de transmisión

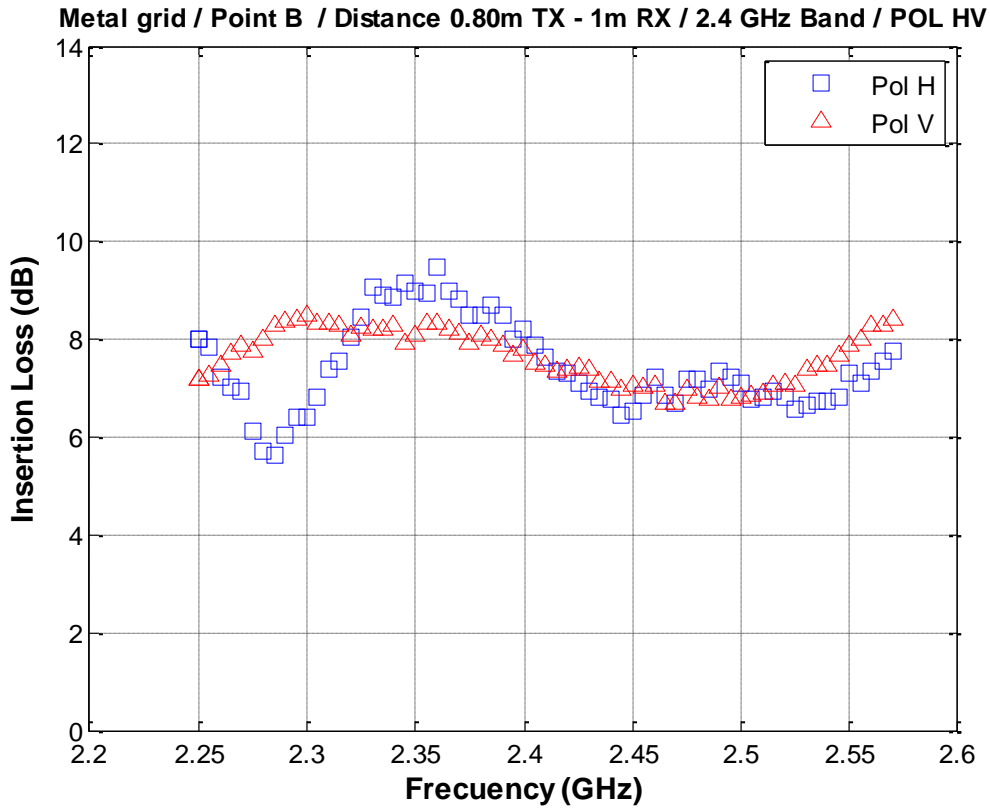


Figura 7.5.19: Medida en 2.4 GHz en el “Punto B” a 0.80 metros de transmisión

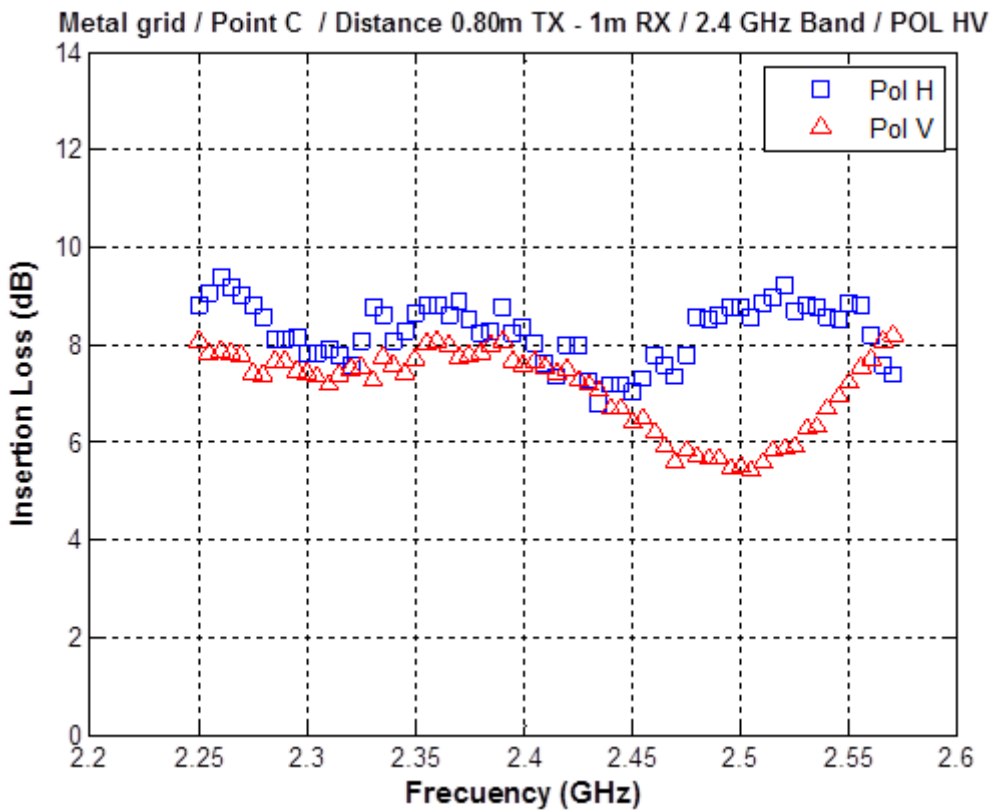


Figura 7.5.20: Medida en 2.4 GHz en el “Punto C” a 0.80 metros de transmisión

- Por último vamos a exponer las diferencias que existen entre las polarizaciones para las tres bandas de 2.4 GHz, 3.3 GHz y 5.5 GHz

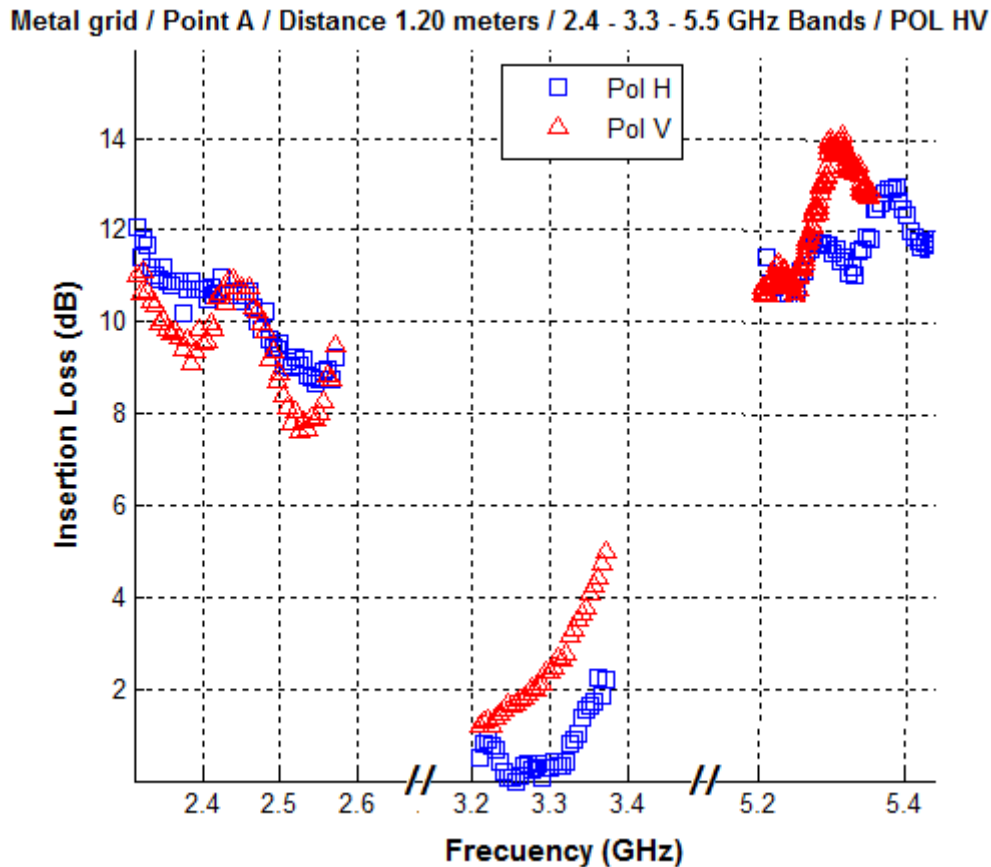


Figura 7.5.21: Medida en las tres bandas en el “Punto A” a 1.20 metros de transmisión

7.5.4 Conclusiones

- En nuestro caso, ocurre lo mismo que lo descrito en la literatura, y es que nuestra “Rejilla con aberturas” actúa, como teóricamente se demuestra, como un filtro inductivo y se comporta como un filtro paso banda, como también debería comportarse según la literatura y muchos estudios realizados relacionados con el mismo tema. Por lo que comprobamos con este análisis del escenario la teoría y la práctica de forma exacta.
- Nuestra rejilla es un filtro paso banda cuando nos referimos a transmisión. En las graficas expuestas no indicamos la transmisión, sino lo opuesto, las pérdidas de inserción, por eso se observa en las representaciones como un filtro banda eliminada. Es decir, cuando existe mucha transmitancia significa implícitamente que existen pocas pérdidas de inserción y la onda se transmite en mayor grado, sin embargo, si existe poca transmitancia significa que existen muchas pérdidas de inserción.

- Además este filtro es resonante, en el cual se observa que la frecuencia de resonancia se sitúa en 3.3 GHz. Teóricamente la frecuencia de resonancia debe calcularse de manera que: [22]

$$\mathbf{g = a + b \quad | \quad f_c = c/g \quad \rightarrow \quad f_c = 3.75 \text{ GHz}}$$

Donde:

- a: lado de la abertura cuadrada. 4mm en nuestro caso.

- b: separación entre aperturas. 4mm en nuestro caso.

- c: Velocidad de la luz:

La razón por la que la frecuencia de resonancia obtenida en las mediciones no coincide con la teórica, se debe a que nuestra rejilla no tiene dimensión infinita, y por tanto efectos de difracción y reflexión en la señal se verán claramente reflejados. Tampoco tiene espesor nulo, que es otra condición teórica a la hora de caracterizar estos elementos como filtros resonantes.

Por lo que estas formulas dan la expresión de forma ideal, sin embargo los dos valores son bastante próximos, y por tanto señalan una correcta caracterización por nuestra parte.

- La transmitancia a través del filtro es independiente de la polarización de la fuente. Pero debido a que el filtro de malla es simétrica en rotación a través de 90 grados, ambos componentes de la polarización "verán" la geometría de la red de igual manera. Esto significa que ambos componentes tienen la misma transmisión y coeficientes de reflexión, y en general el coeficiente de transmisión no es por lo tanto una función del ángulo de polarización.

Nuestro caso es exactamente el descrito, sin embargo debido a que es una plancha rectangular son espesor finito y con dimensiones limitadas, en vez de superficie infinita, las transmisiones en diferentes polarizaciones, en algunos puntos de medición, variarán, sobre todo al aumentar la frecuencia, ya sea por difracción o porque algunas ondas no atraviesan la plancha.

Sin embargo, a efectos generales la polarización no afecta de manera significativa en las mediciones, y por tanto podremos corroborar lo impuesto teóricamente con respecto a las polarizaciones.

7.6 Escenario 6: Pasillo con tres puertas de madera

El sexto escenario que vamos a caracterizar es un pasillo con tres puertas de madera, situado en el baño de la primera planta del “Edificio C” en Escuela Politécnica Superior de la Universidad Autónoma de Madrid.

7.6.1 Estructura, dimensiones y puntos de análisis



Figura 7.6.1 y 7.6.2: Diferentes vistas del pasillo con 3 puertas de madera

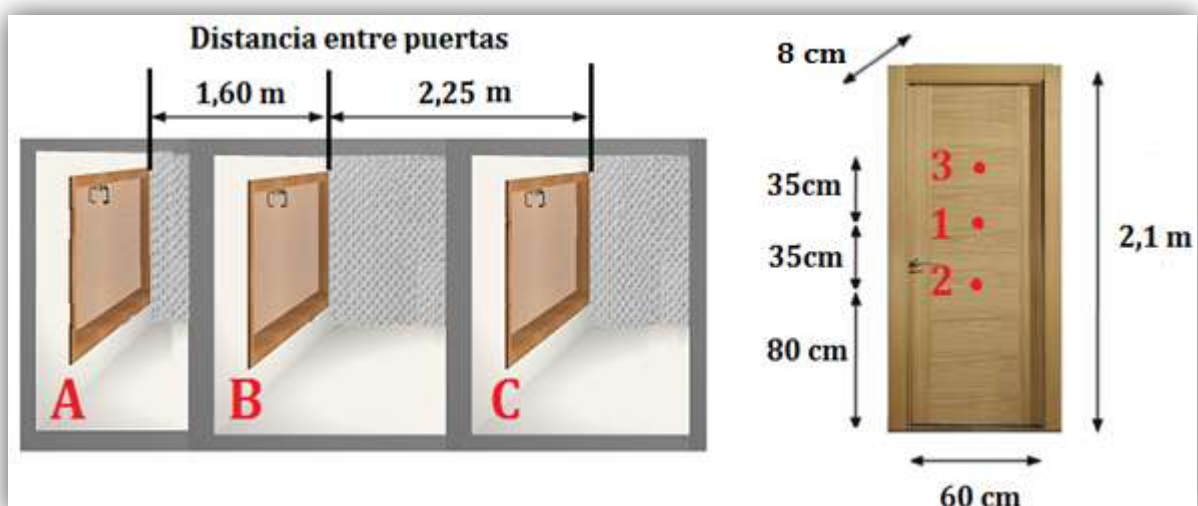


Figura 7.6.3: Dimensiones y puntos de análisis del escenario

7.6.2 Teoría aplicada: Modelización de la estructura

El escenario, como hemos explicado, es un pasillo rectangular dividido en tres zonas por puertas de madera. Lo que interesa en este escenario es medir las pérdidas de inserción que se producen a través de las puertas poniendo la antena transmisora a una cierta distancia de la “Puerta A” y situando la antena receptora al final del pasillo detrás de la “Puerta C”.

En este escenario se pueden dar múltiples casos de propagación, en los que cada situación es un modelo nuevo a estudiar. Citamos por tanto los siguientes casos a caracterizar:

- Caso A: “Puerta A” cerrada, las demás puertas abiertas.
- Caso B: “Puerta B” cerrada, las demás puertas abiertas.
- Caso C: “Puerta C” cerrada, las demás puertas abiertas.
- Caso AB: “Puerta A” y “Puerta B” cerradas, la puerta restante abierta.
- Caso BC: “Puerta B” y “Puerta C” cerradas, la puerta restante abierta.
- Caso AC: “Puerta A” y “Puerta C” cerradas, la puerta restante abierta.
- Caso ABC: Todas las puertas cerradas.

Por otro lado, hay que indicar que las pérdidas por absorción o por penetración de este material, la madera, son generalmente bajas. Aun así, podemos encontrar efectos indeseados que podrían afectar la medida de cada caso. Citamos algunos de ellos:

- **Reflexión:** Los puntos elegidos para analizar el escenario están concentrados manteniendo una cierta distancia entre el suelo y el techo para evitar las posibles reflexiones que se pueden ocasionar.
- **Multitrayecto:** Así mismo los tres puntos elegidos para analizar el escenario están concentrados en línea recta en el medio de la puerta de tal manera que se evite lo máximo posible el multitrayecto de los laterales del pasillo al transmitir y realizar la medición.

Igualmente los múltiples multitrayectos que se pueden ocasionar a lo largo de la propagación en el pasillo, son inevitables. Se puede decir, que al ser un pasillo estrecho rectangular, este escenario puede actuar de guía de onda, y por lo tanto las pérdidas del radioenlace serían pequeñas, ya que la señal principal que atraviesa las puertas estaría contribuida con todos los posibles rayos reflejados por multitrayecto.

7.6.3 Resultados y análisis del escenario

- A continuación vamos exponer las medidas para cada tipo de banda de frecuencia utilizada en cada uno de los diferentes puntos de interés, donde se comparará los diferentes casos anteriormente descritos: A, B, C, AB, BC, AC y ABC.

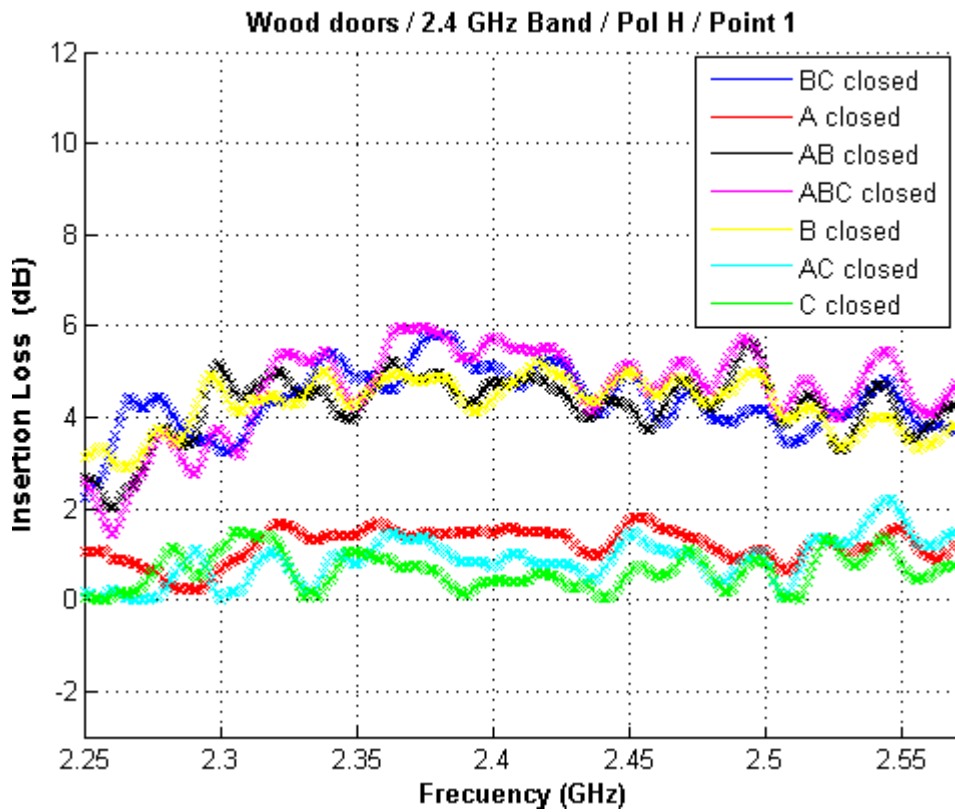


Figura 7.6.4: Todos los casos en el “Punto 1” en la banda de 2.4 GHz

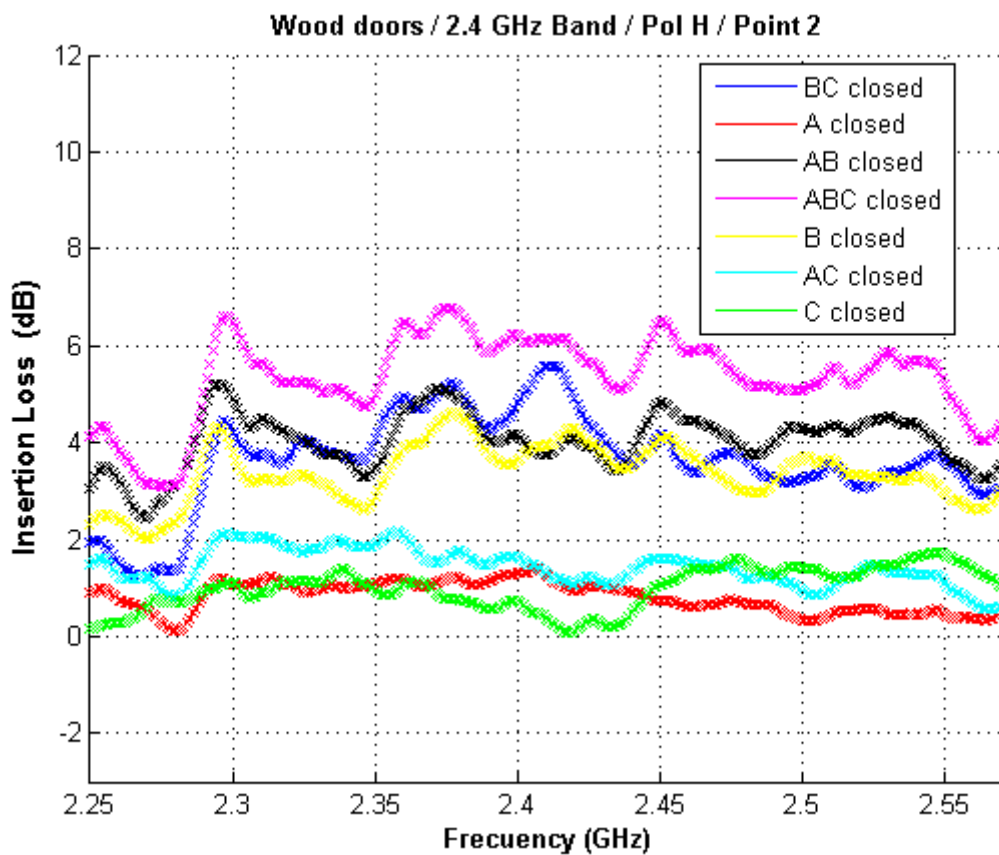


Figura 7.6.5: Todos los casos en el “Punto 2” en la banda de 2.4 GHz

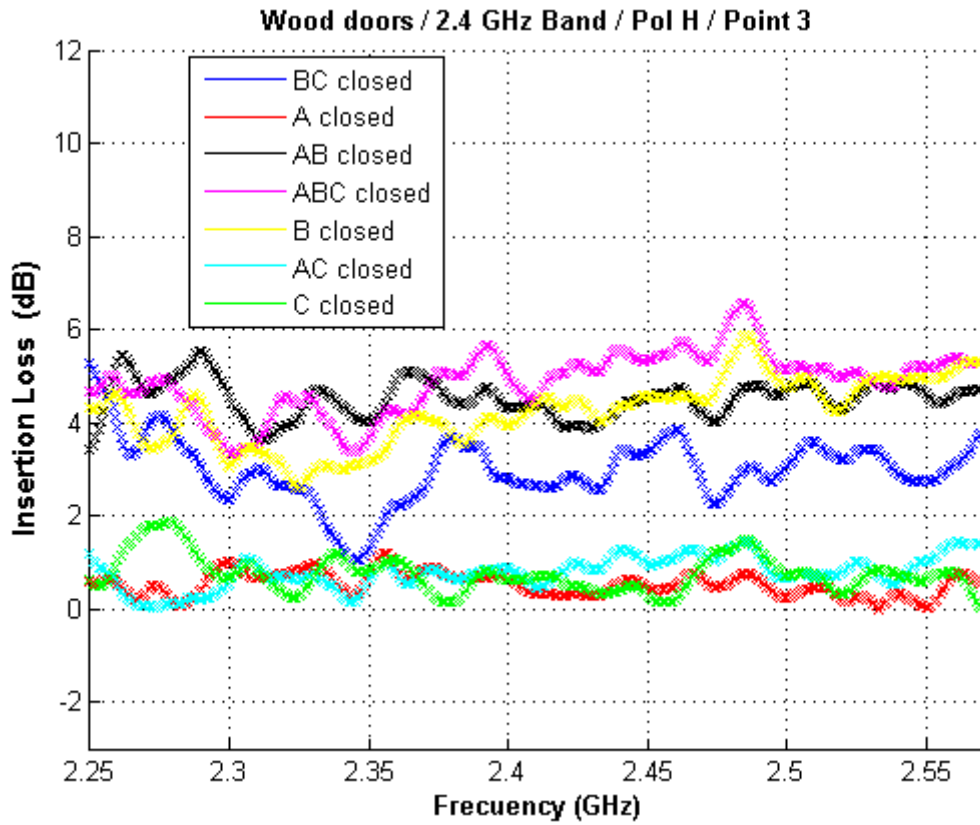


Figura 7.6.6: Todos los casos en el “Punto 3” en la banda de 2.4 GHz

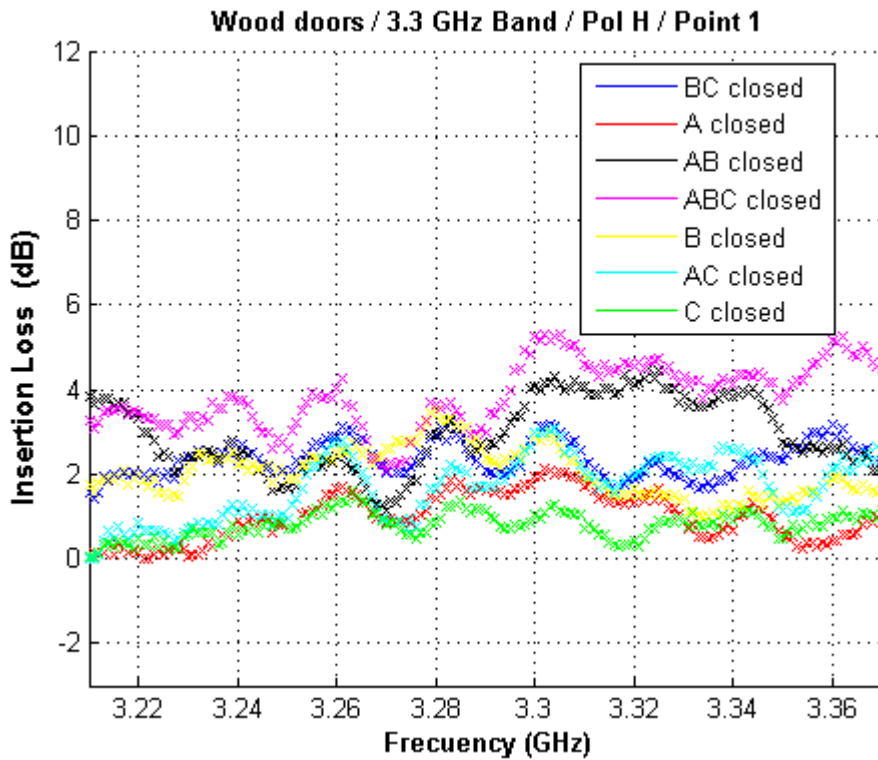


Figura 7.6.7: Todos los casos en el “Punto 1” en la banda de 3.3 GHz

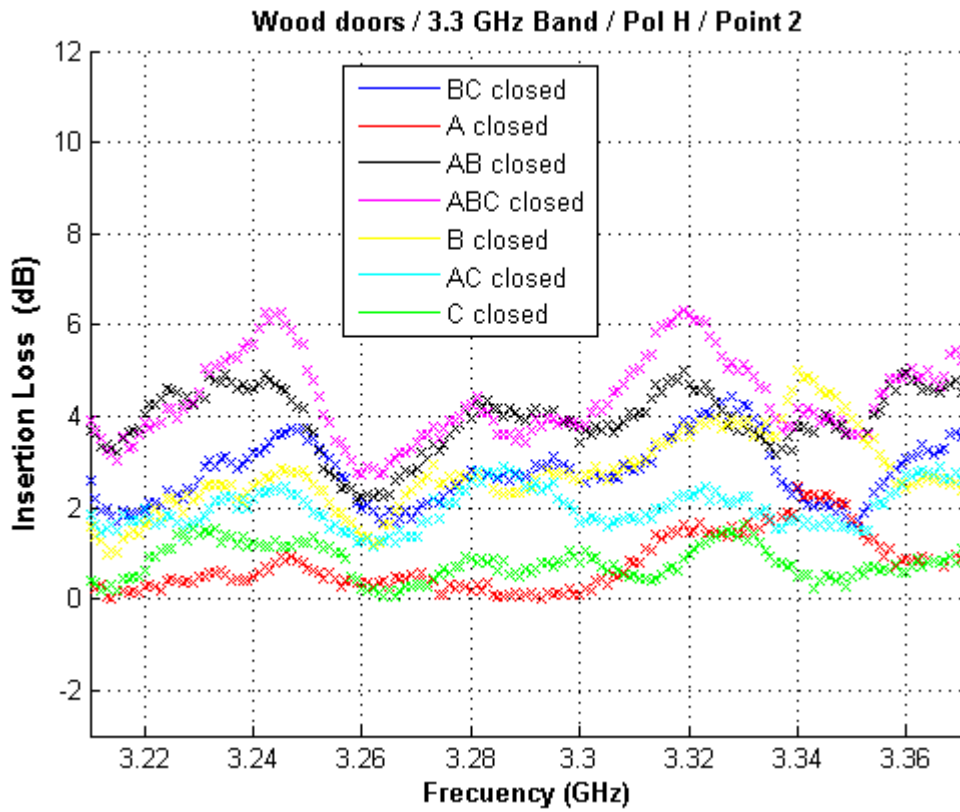


Figura 7.6.8: Todos los casos en el "Punto 2" en la banda de 3.3 GHz

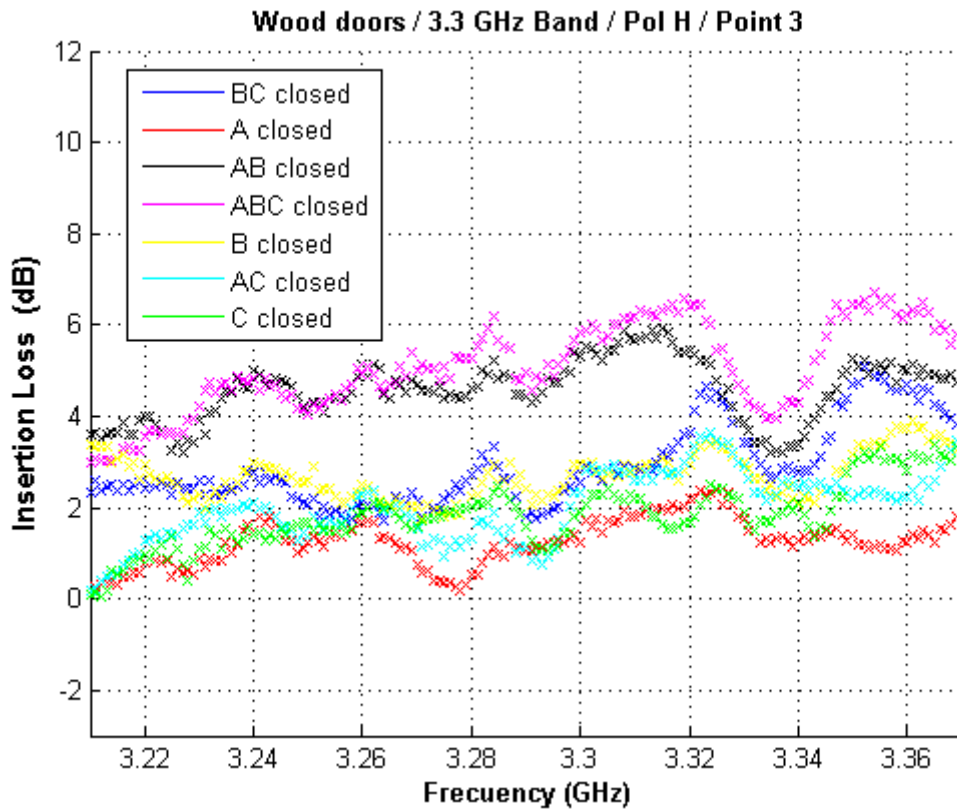


Figura 7.6.9: Todos los casos en el "Punto 3" en la banda de 3.3 GHz

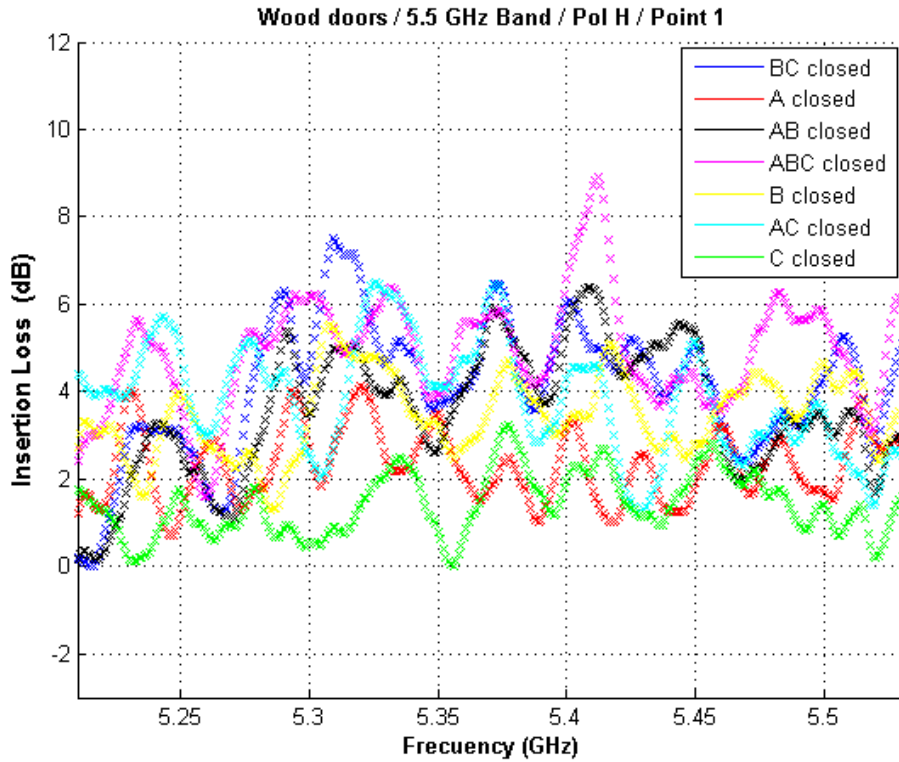


Figura 7.6.10: Todos los casos en el “Punto 1” en la banda de 5.5 GHz

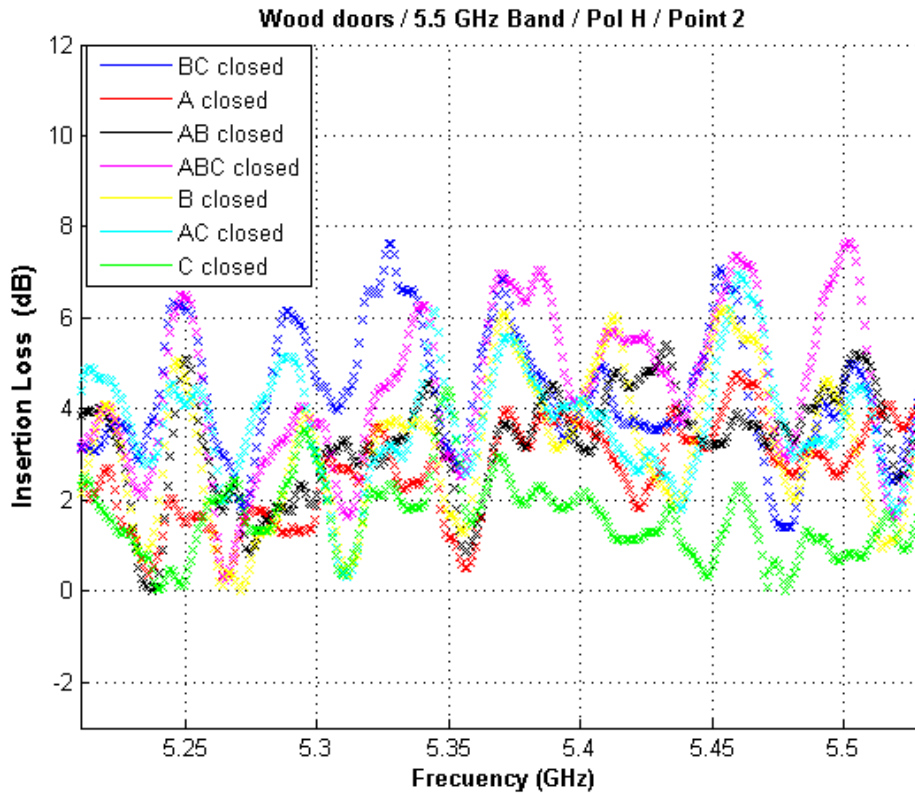


Figura 7.6.11: Todos los casos en el “Punto 2” en la banda de 5.5 GHz

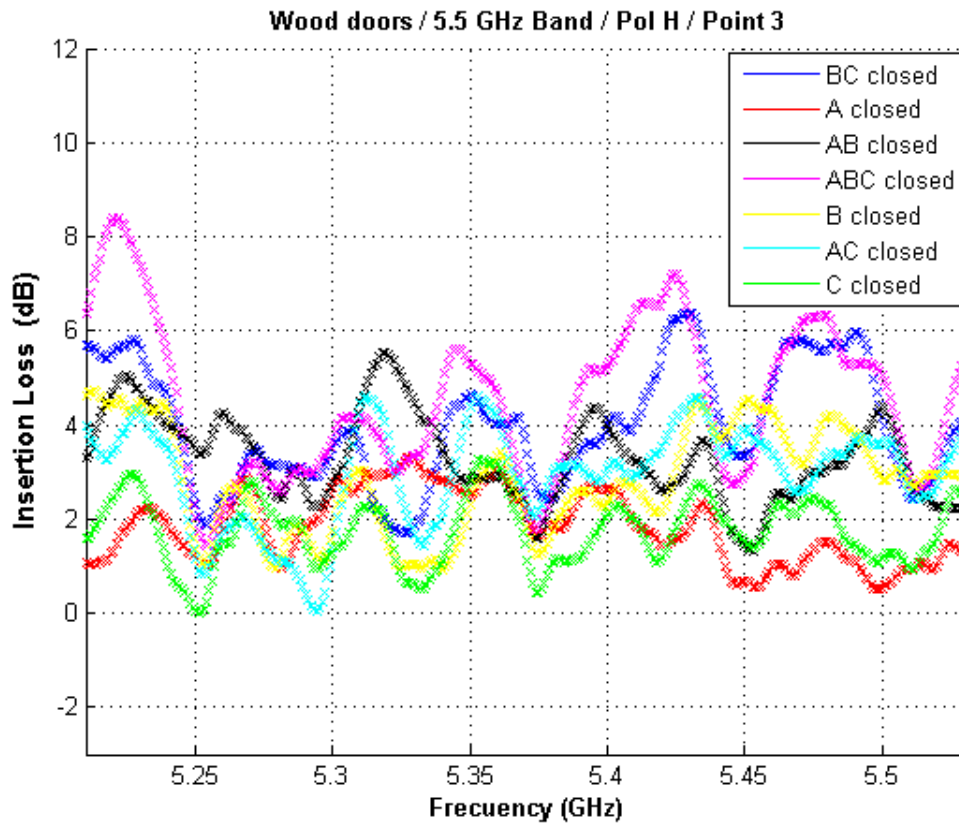


Figura 7.6.12: Todos los casos en el “Punto 3” en la banda de 5.5 GHz

- Por último vamos exponer el nivel de pérdida de inserción para cada banda de frecuencia utilizada, donde se comparará los diferentes casos anteriormente descritos: A, B, C, AB, AB, BC, AC y ABC y los diferentes puntos de interés. Con las siguientes gráficas, lo que queremos reflejar es, qué está ocurriendo realmente en cada “Caso” y como afecta utilizar bandas de frecuencias cada vez más altas, siempre intentando que sea de la manera más visual y determinante posible

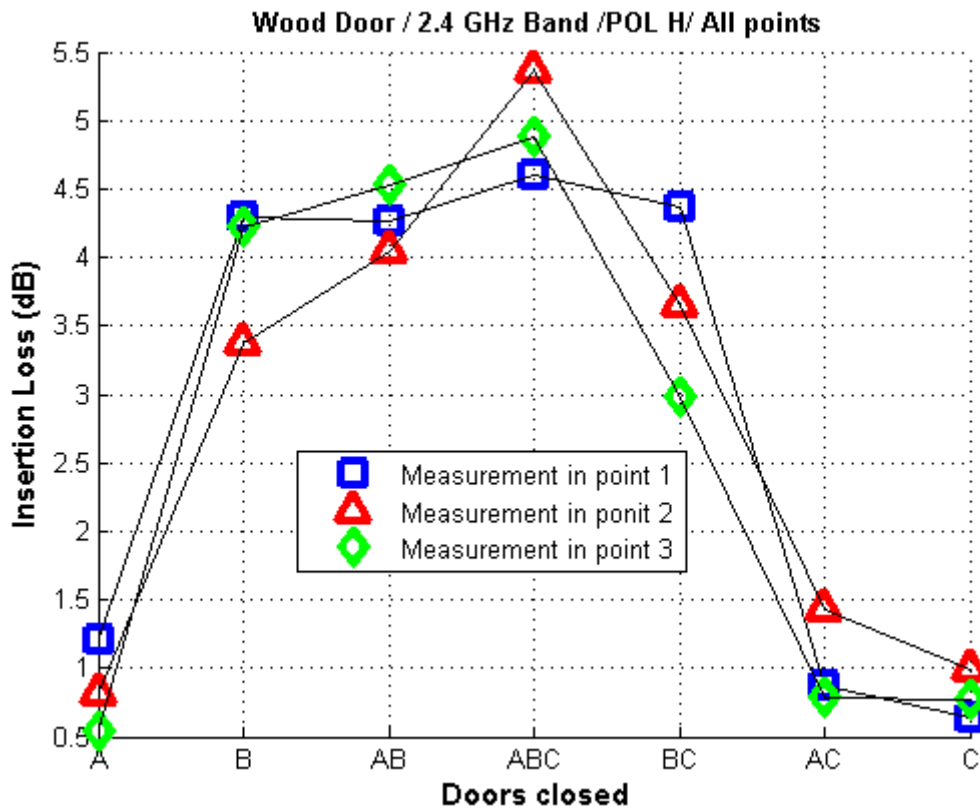


Figura 7.6.13: Todos los casos, en la banda de 2.4 GHz, para todos los puntos

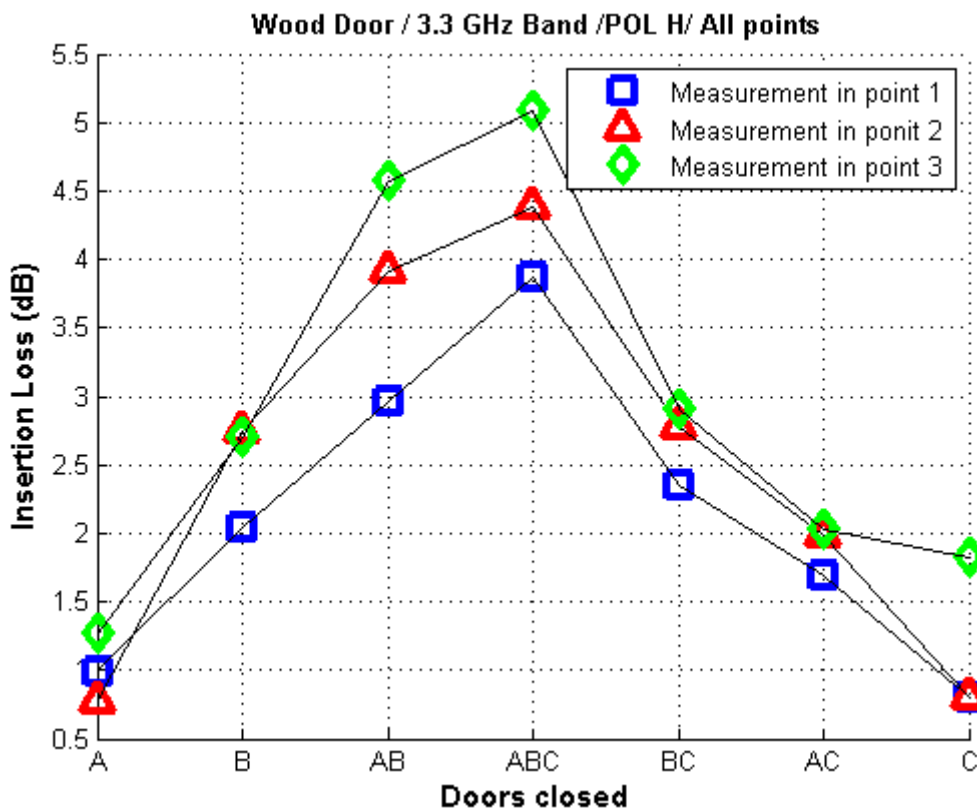


Figura 7.6.14: Todos los casos, en la banda de 3.3 GHz, para todos los puntos

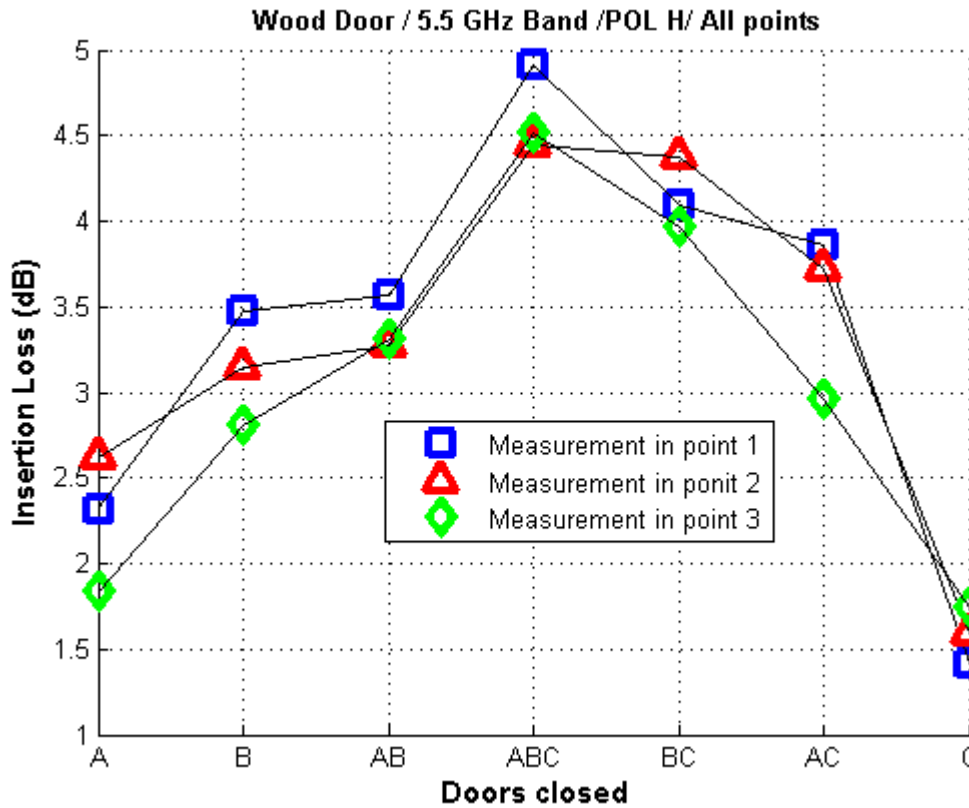


Figura 7.6.15: Todos los casos, en la banda de 5.5 GHz, para todos los puntos

7.6.4 Conclusiones

Este escenario es un claro ejemplo del problema del multirrayecto. Al ser un escenario simulando un entorno de propagación cerrado rectangular con una determinada profundidad, se pueden hacer similitudes a un modelo de propagación en guía onda.

Las pérdidas del radioenlace son pequeñas, ya que la señal principal que atraviesa las puertas esta contribuida por todos los posibles rayos reflejados por este multirrayecto. Además se puede observar que a altas frecuencias las pérdidas de inserción varían con el cambio pequeño de frecuencias de manera destacables, simulando los efectos típicos de ruido en la señal, sobre todo a bandas de utilización altas como se observa en la banda de 5.5 GHz. Esto supone falseo en las medidas o diferentes tipos de compensaciones en los rayos reflejados. Por otro lado, hay que indicar que las pérdidas por absorción o por penetración de este material, la madera, son generalmente bajas teóricamente.

Para las situaciones “ABC”, “AB”, “BC”, “BC” las pérdidas de inserción son más altas que en los demás casos, y esto se debe al número de puertas que atraviesa la señal. En el caso “AC” las pérdidas son un poco menores a estos anteriores casos, esto se debe a que las puertas que están cerradas son justo las que se sitúan cerca de las antenas, y por tanto disminuyen los efectos en el falseo de medidas que hemos comentado. Cuando solo se atraviesa una puerta las pérdidas son mucho más bajas, ya que la penetración del material, como es la madera, es un punto a tener en cuenta.

7.7 Escenario 7: Personas

En este escenario vamos a caracterizar las pérdidas de inserción que pueden producir en las personas cuando estas se interponen directamente en el radioenlace. Los sujetos de experimentación tendrán diferentes aptitudes físicas para abarcar un ámbito más generalista y proporcionar datos generales sobre las pérdidas producidas es un ser humano estándar.

7.7.1 Estructura, dimensiones y puntos de análisis



Figura 7.7.1 y 7.7.2: Vista frontal y perfil del Sujeto 1



Figura 7.7.3 y 7.7.4: Vista frontal y perfil del Sujeto 2



Figura 7.7.5 y 7.7.6: Vista frontal y perfil del Sujeto 3



Figura 7.7.7 y 7.7.8: Vista frontal y perfil del Sujeto 4



Figura 7.7.9 y 7.7.10: Vista frontal y perfil del Sujeto 5

	Nombre Completo del Sujeto	Altura (m)	Anchura frontal (cm)	Anchura del perfil (cm)
Sujeto 1	Bazil Ahmed	1.80	33	28
Sujeto 2	Tomás Merino	1.71	29	18
Sujeto 3	Juan Pablo Montero	1.84	33	26
Sujeto 4	Guillermo Montañer	1.91	26	16
Sujeto 5	Guillermo Gálvez	1.80	30	20

Tabla 7.1: Datos físicos de cada sujeto

7.7.2 Teoría aplicada: Modelización de la estructura

El ser humano está compuesto de un 70% de agua aproximadamente, y esto significa que el cuerpo en sí, es un obstáculo con propiedades de absorción de ondas electromagnéticas potencialmente alto.

Como se comentó en el “Capítulo 3”, en el tema de “Absorción”, el metal junto al agua llegan a ser dos de los materiales con más índice de absorción, y por lo tanto, estos dos, son los tipos de obstáculos que más pérdidas de inserción podrían generar.

Por este motivo cuando queremos ofrecer una cobertura en una sala o recinto, donde la aglomeración de gente puede llegar a ser alta, hay que prevenir las pérdidas de señal que se pueden producir, no solo por los objetos o los tipos de materiales de los que este hecho el recinto, sino por lo más importante, las personas que podrían existir en el interior.

Para cada uno de los sujetos anteriormente descritos, se han realizado diferentes mediciones para diversas posturas o zonas corporales, de tal manera que el estudio de las pérdidas de inserción que se producen en el ser humano sea lo máximo de específicas y útiles a la hora de tenerlas en cuenta en un radioenlace. En la siguiente figura vamos a especificar cuáles son las posturas y zonas que se han elegido para la caracterización.

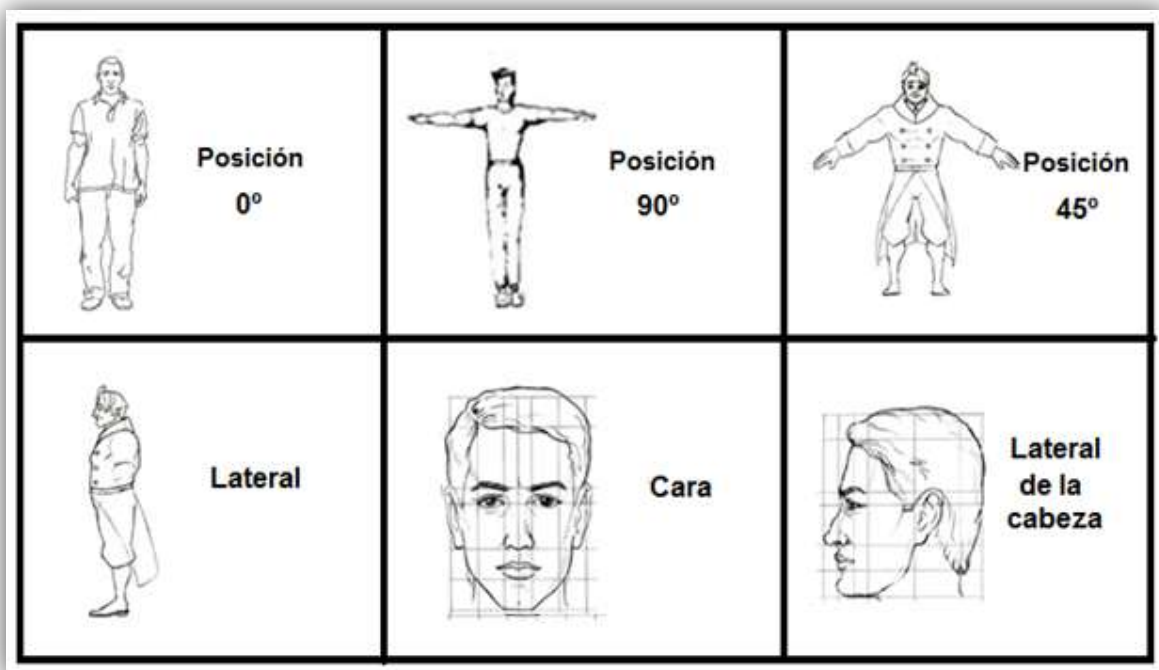


Figura 7.7.11: Posturas y zonas de medición características del escenario

Las diferentes posiciones nominadas: “Posición 0°”, “Posición 90°”, “Posición 45°” y “Lateral”, nos proporcionarían estimación de lo que podrían producir en términos de pérdidas el ser humano en cualquier ámbito. Mientras que las mediciones en la cabeza, nos darán una idea de las pérdidas que se pueden llegar a producir cuando por ejemplo hablamos por el teléfono móvil.

7.6.3 Resultados y análisis del escenario

- Caso A: En este caso vamos a exponer las medidas realizadas en las tres bandas de frecuencia para las diferentes posiciones y zonas anteriormente descritas de cada uno de los sujetos, de manera individual. Es decir, entre antena transmisora y receptora el único obstáculo que se interpone es el sujeto.



Figura 7.7.12: Caso A: Un solo sujeto como obstáculo

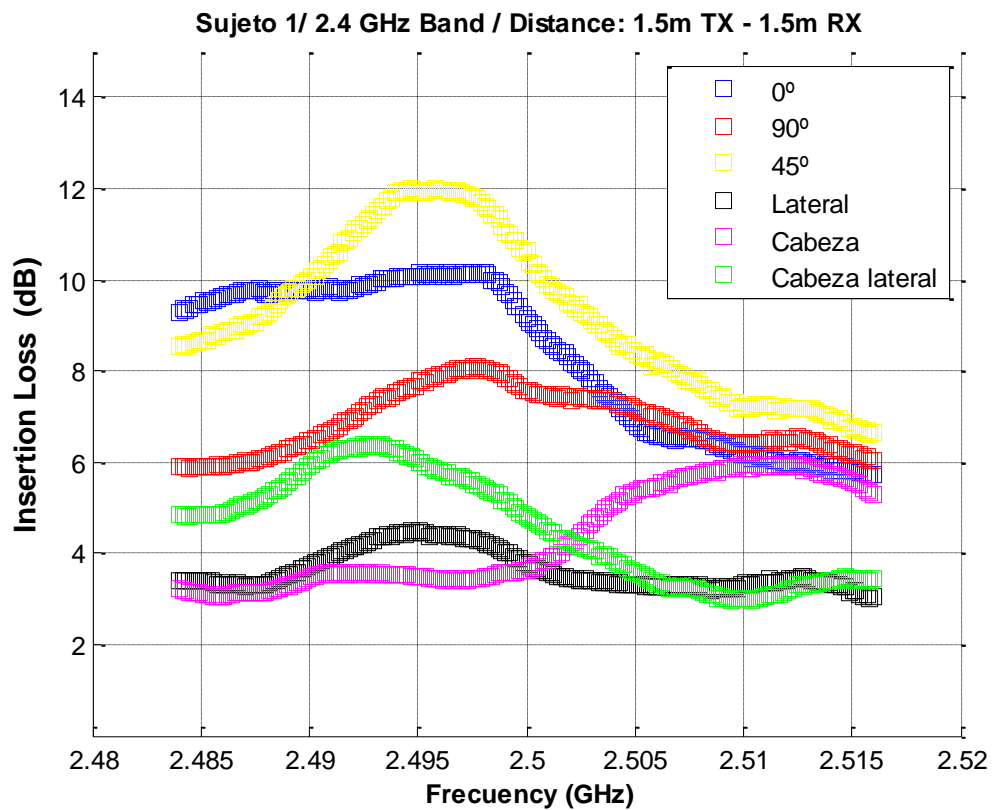


Figura 7.7.13: Caso A: Sujeto 1 en la banda 2.4 GHz

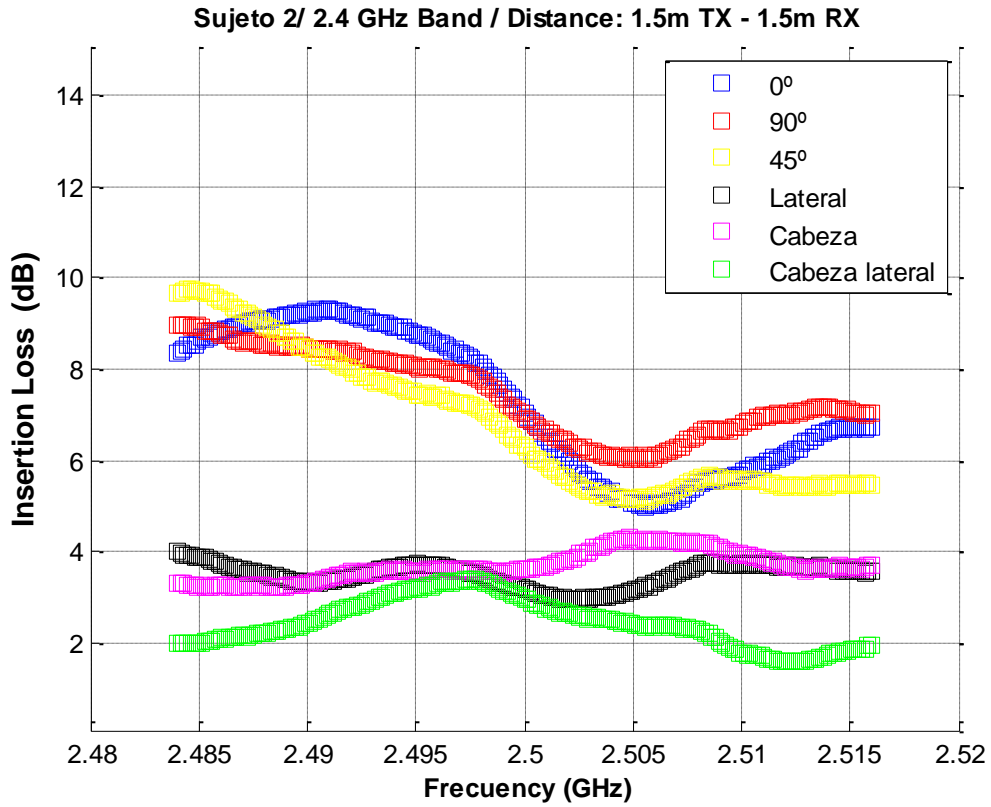


Figura 7.7.14: Caso A: Sujeto 2 en la banda 2.4 GHz

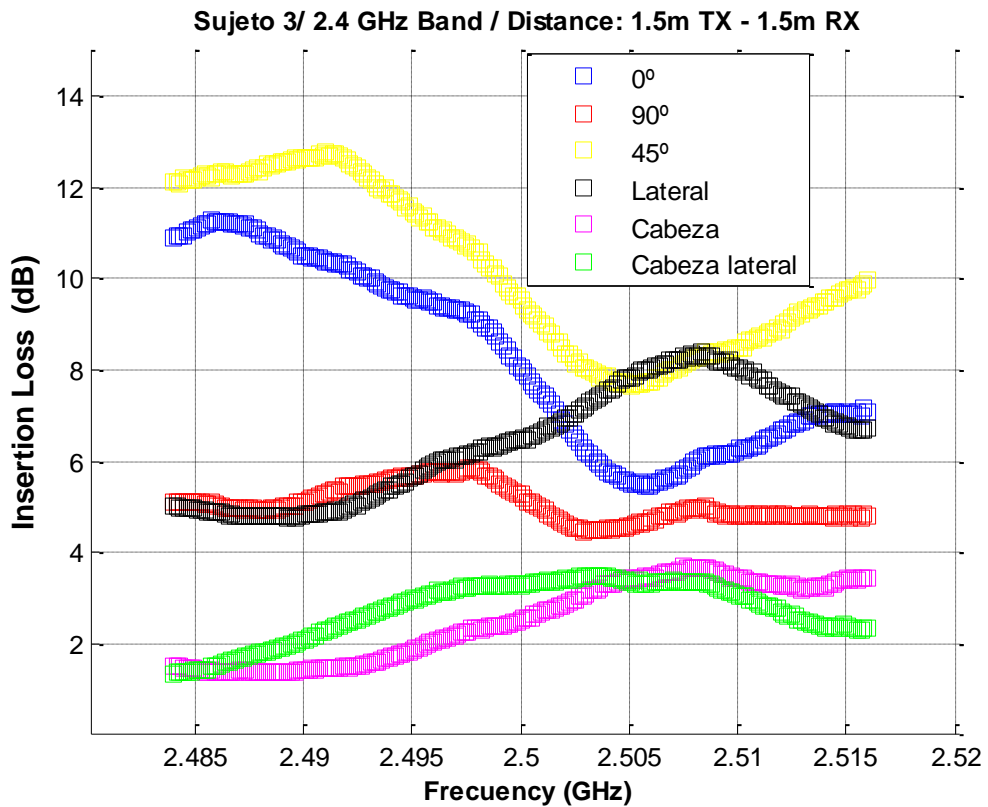


Figura 7.7.15: Caso A: Sujeto 3 en la banda 2.4 GHz

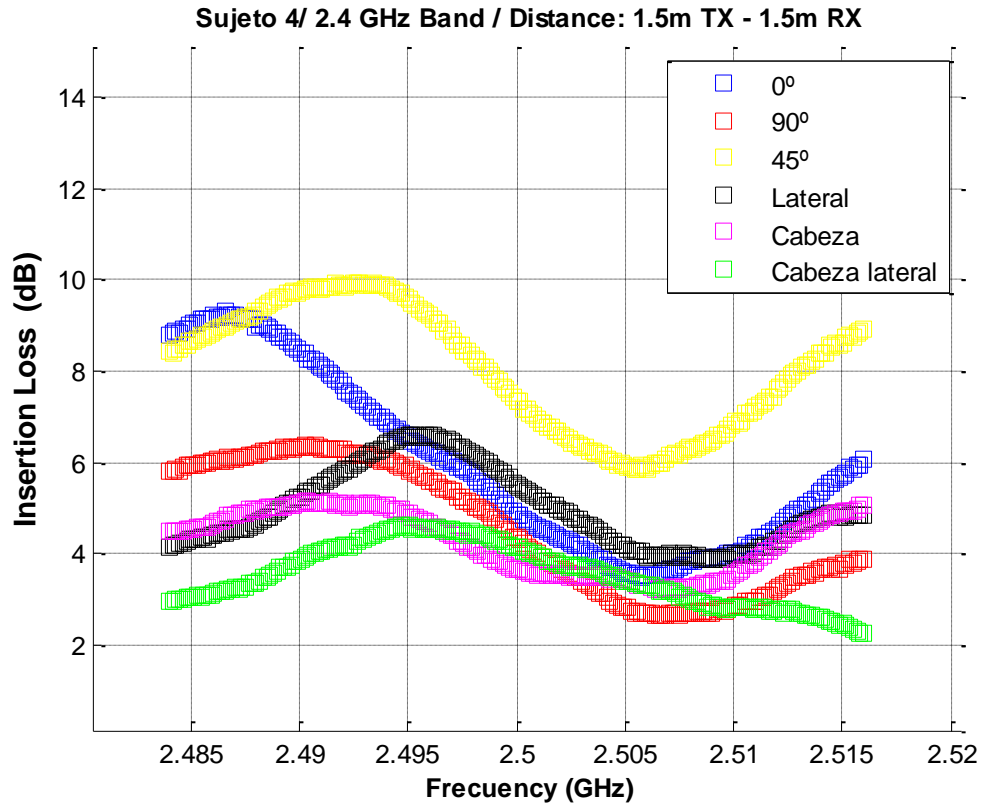


Figura 7.7.16: Caso A: Sujeto 4 en la banda 2.4 GHz

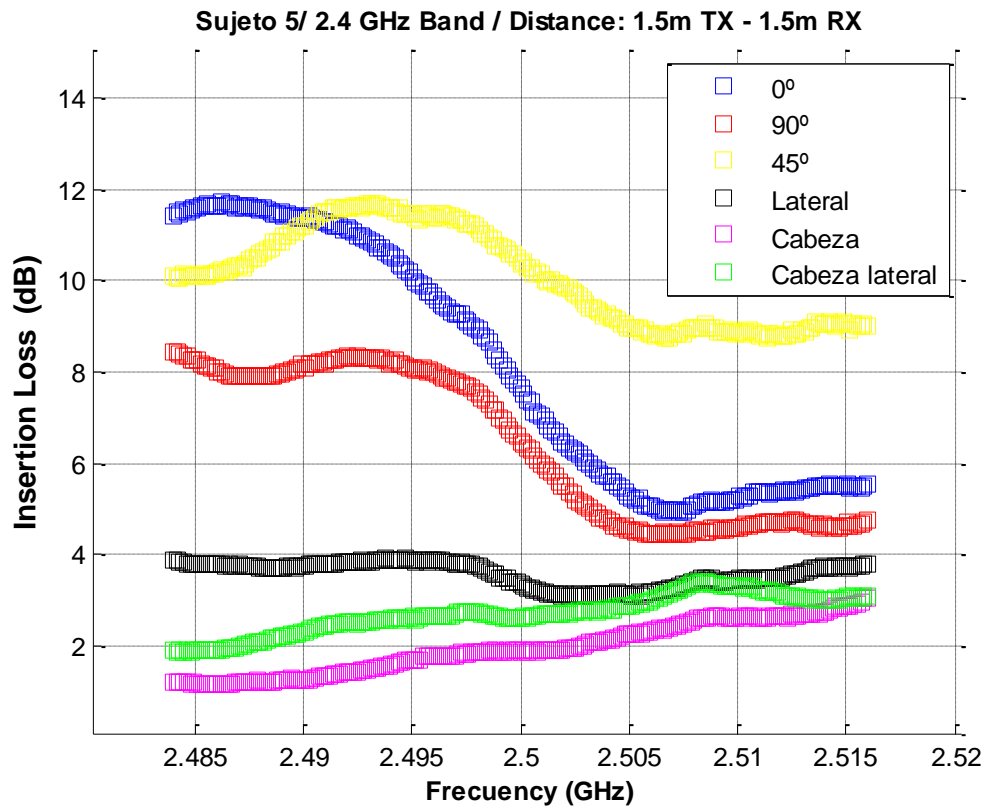


Figura 7.7.17: Caso A: Sujeto 5 en la banda 2.4 GHz

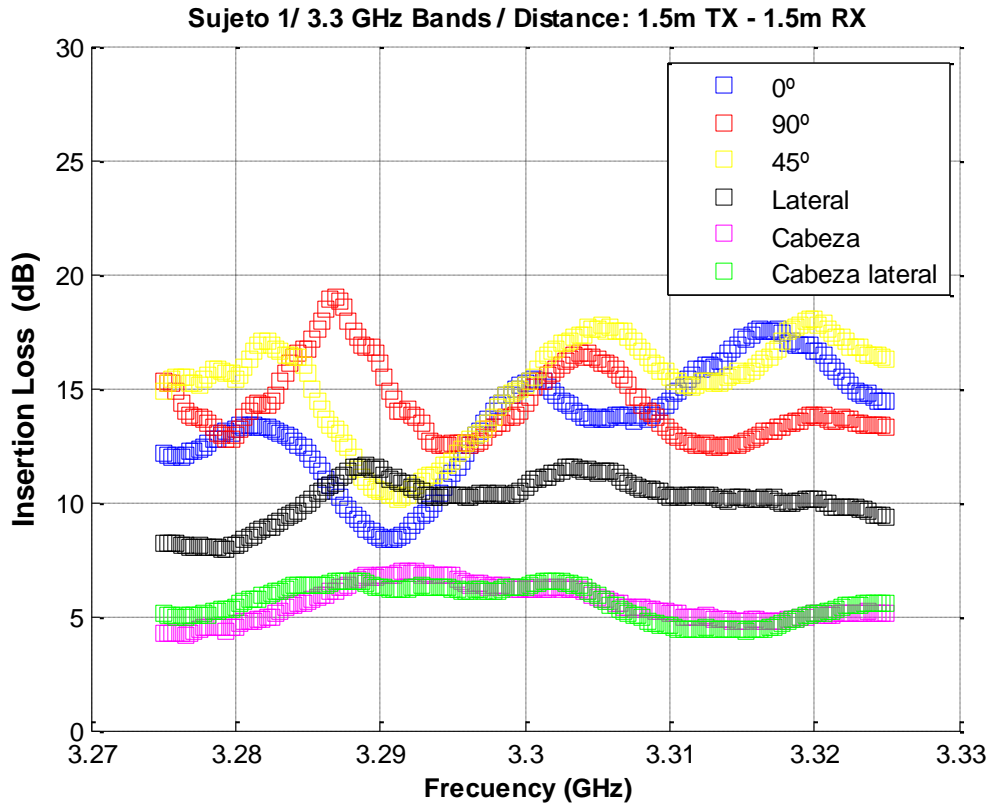


Figura 7.7.18: Caso A: Sujeto 1 en la banda 3.3 GHz

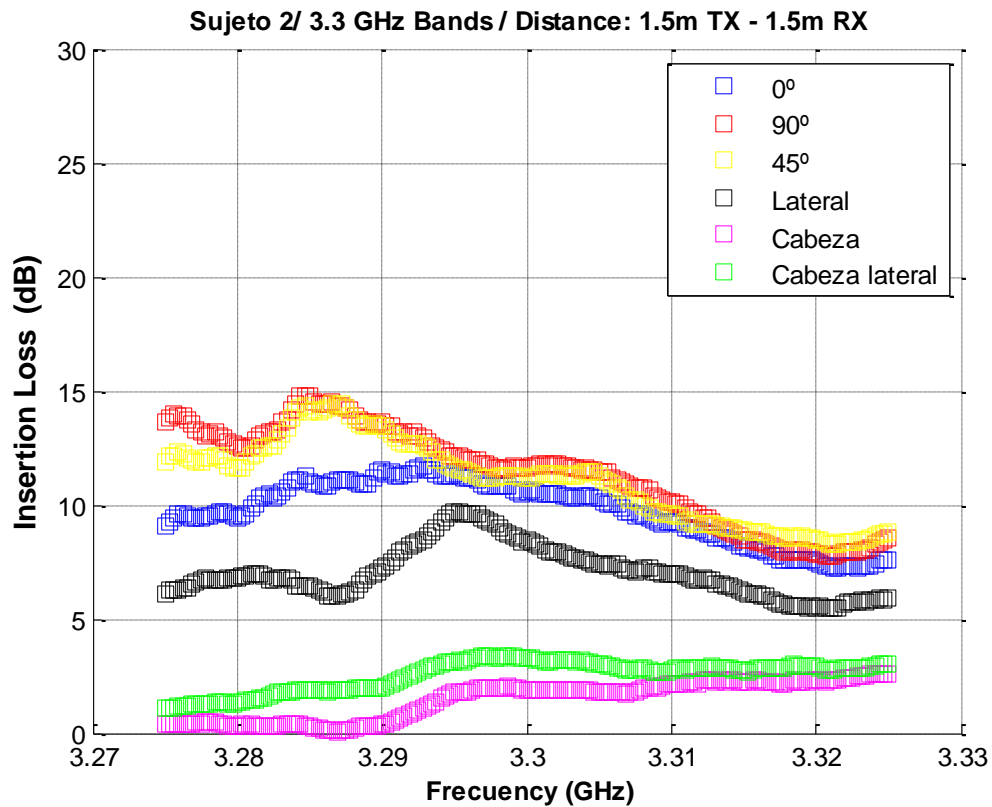


Figura 7.7.19: Caso A: Sujeto 2 en la banda 3.3 GHz

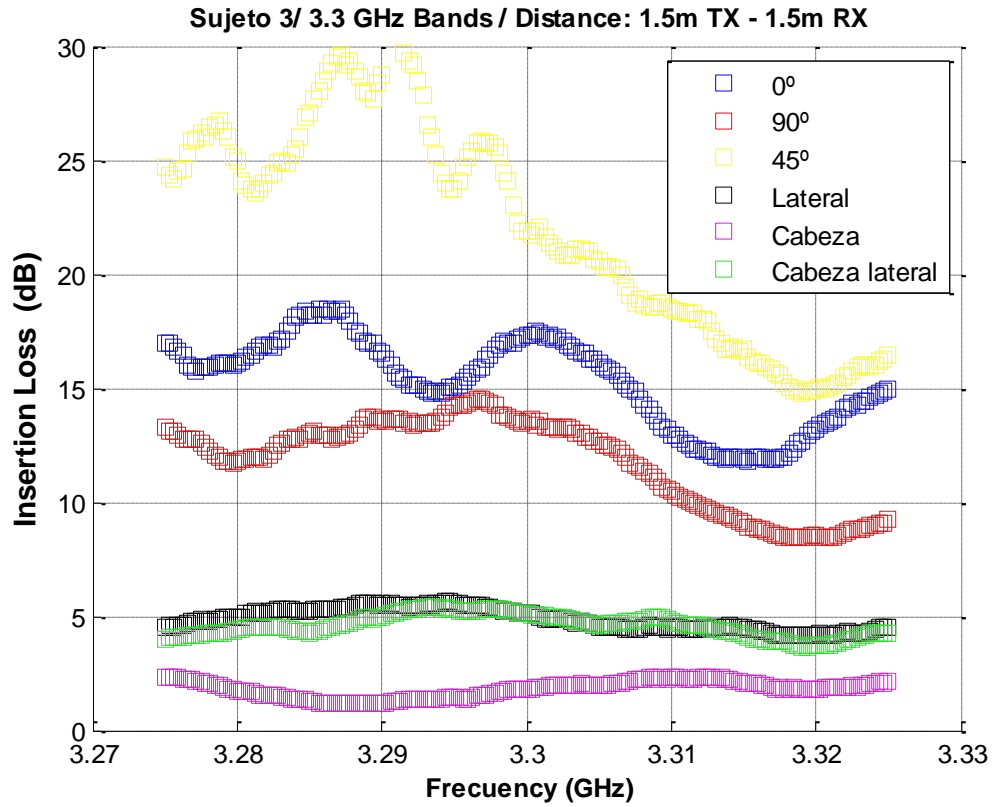


Figura 7.7.20: Caso A: Sujeto 3 en la banda 3.3 GHz

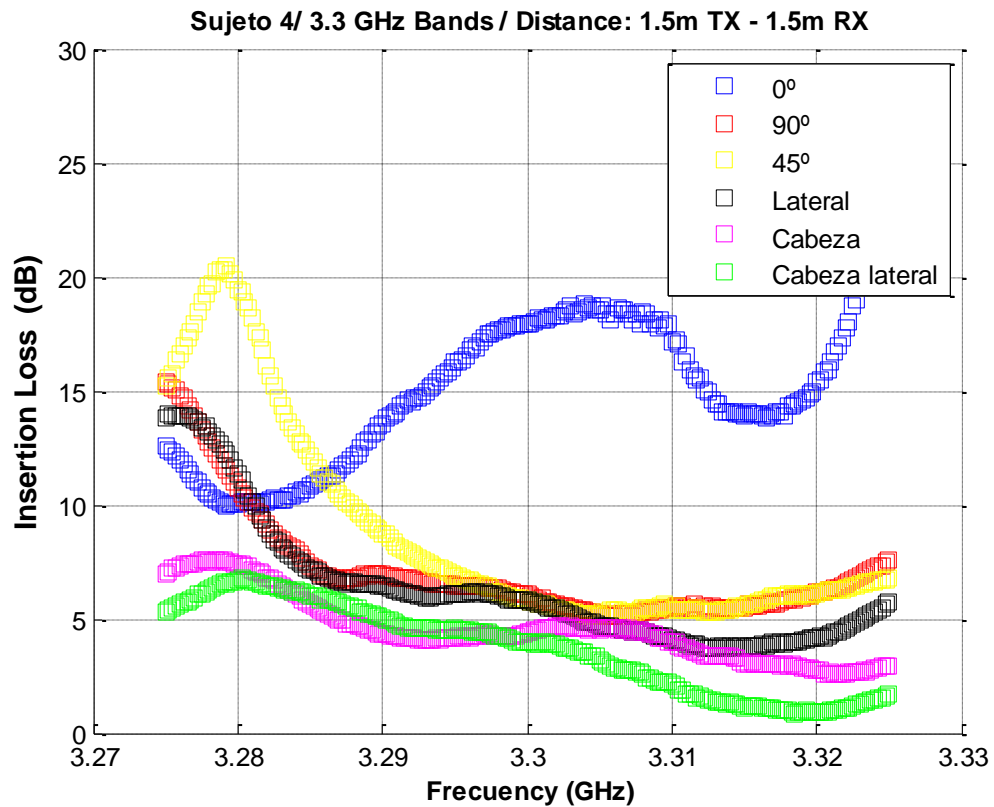


Figura 7.7.21: Caso A: Sujeto 4 en la banda 3.3 GHz

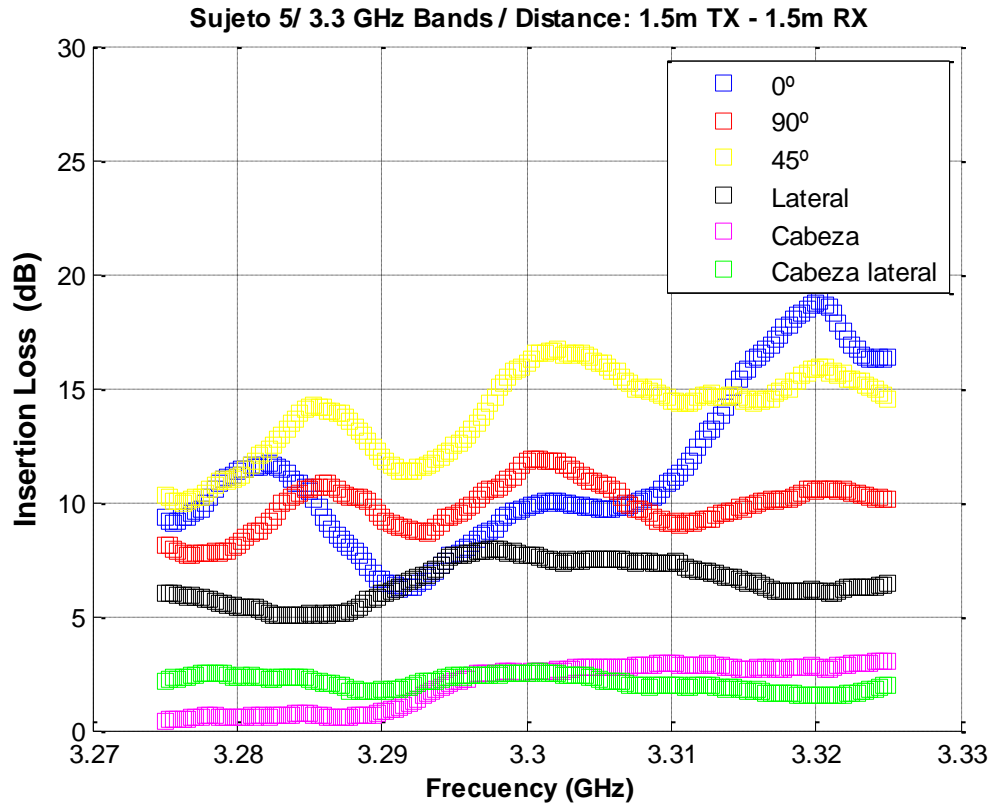


Figura 7.7.22: Caso A: Sujeto 5 en la banda 3.3 GHz

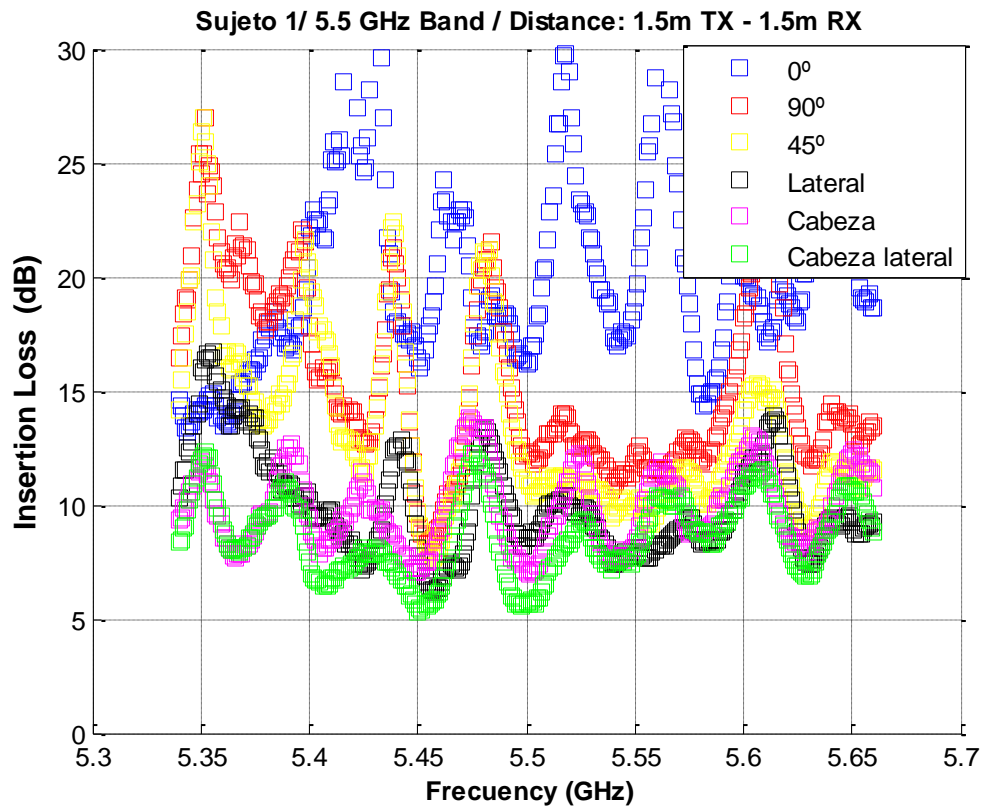


Figura 7.7.23: Caso A: Sujeto 1 en la banda 5.5 GHz

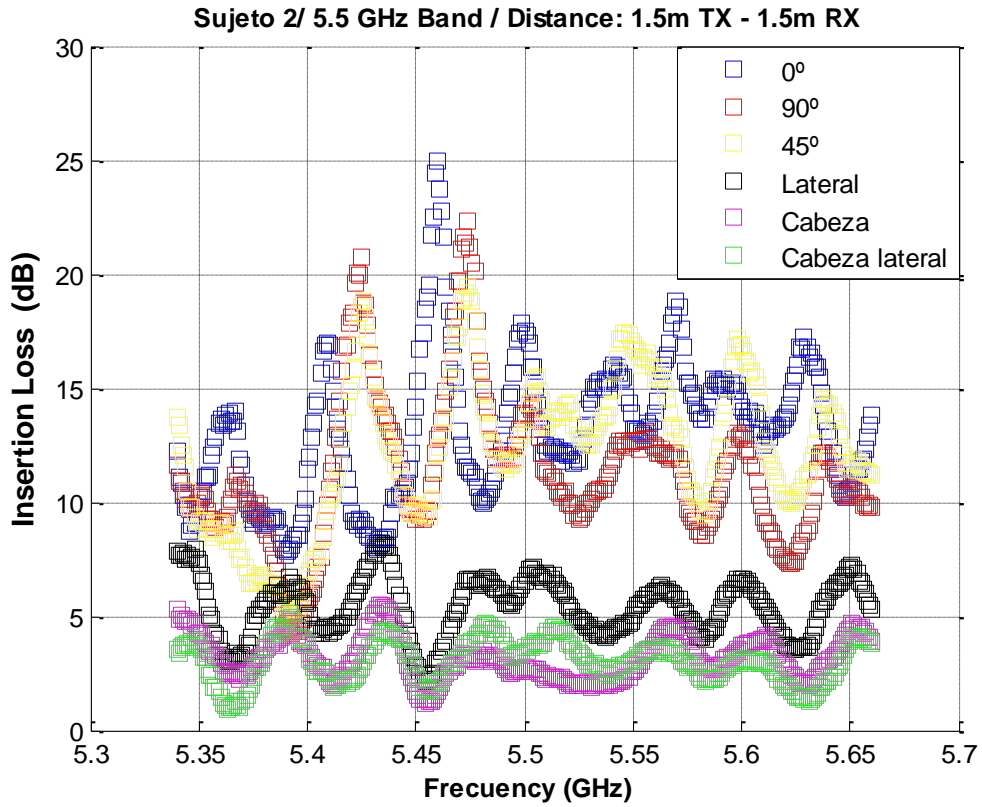


Figura 7.7.24: Caso A: Sujeto 2 en la banda 5.5 GHz

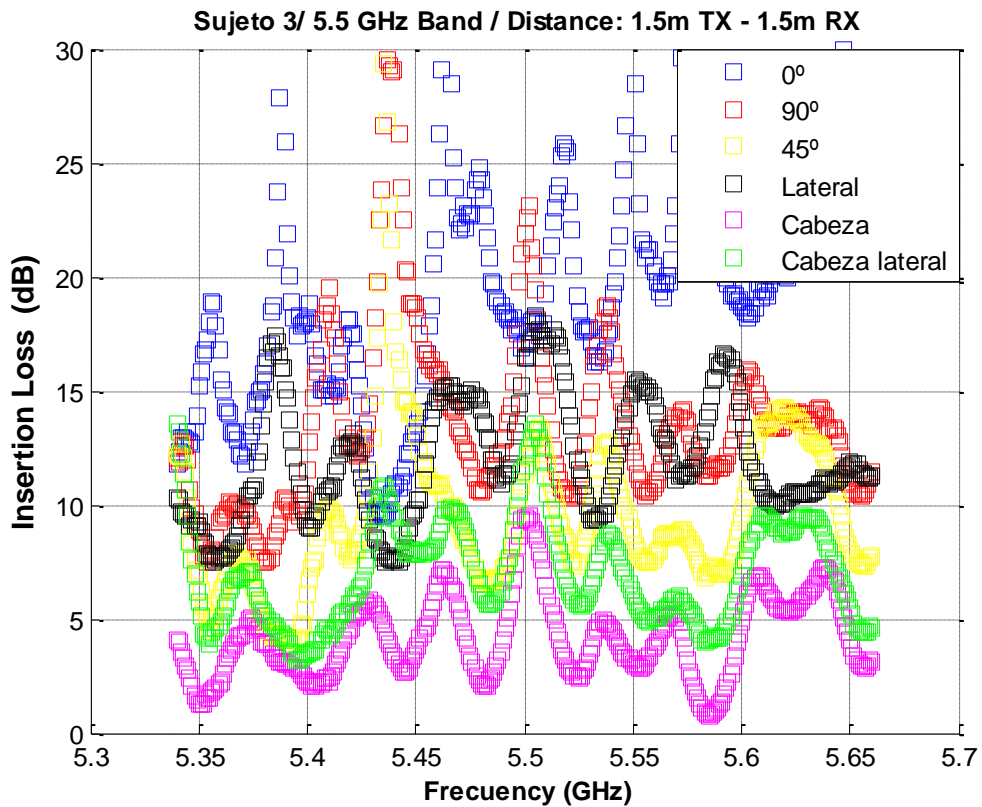


Figura 7.7.25: Caso A: Sujeto 3 en la banda 5.5 GHz

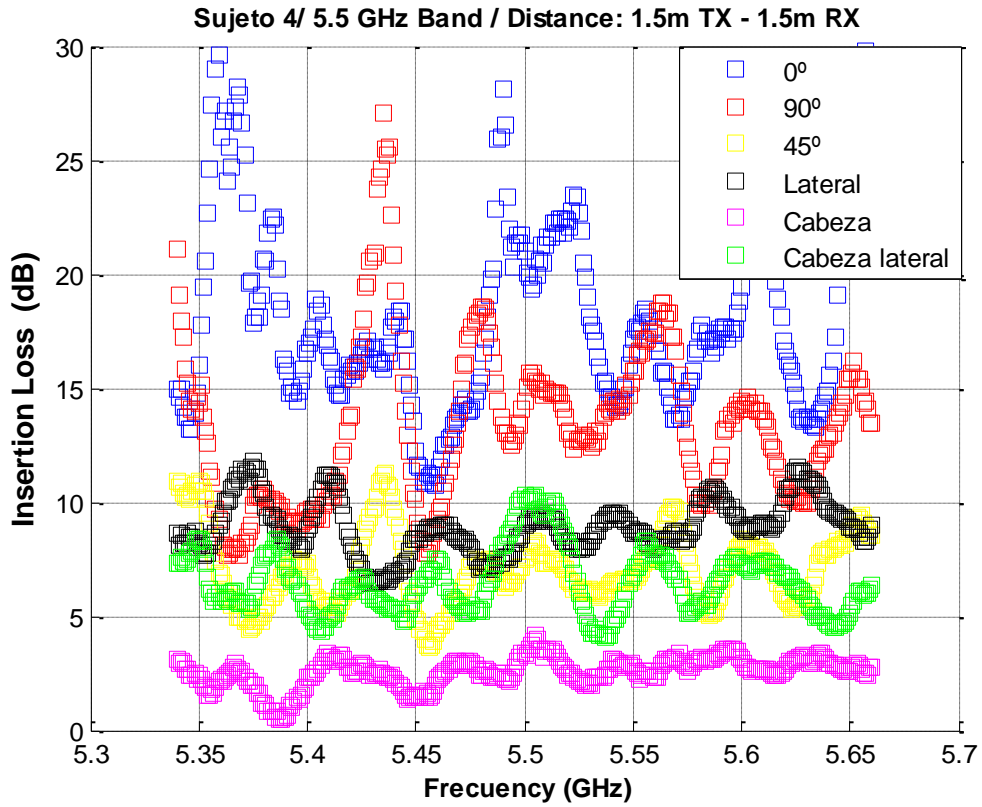


Figura 7.7.26: Caso A: Sujeto 4 en la banda 5.5 GHz

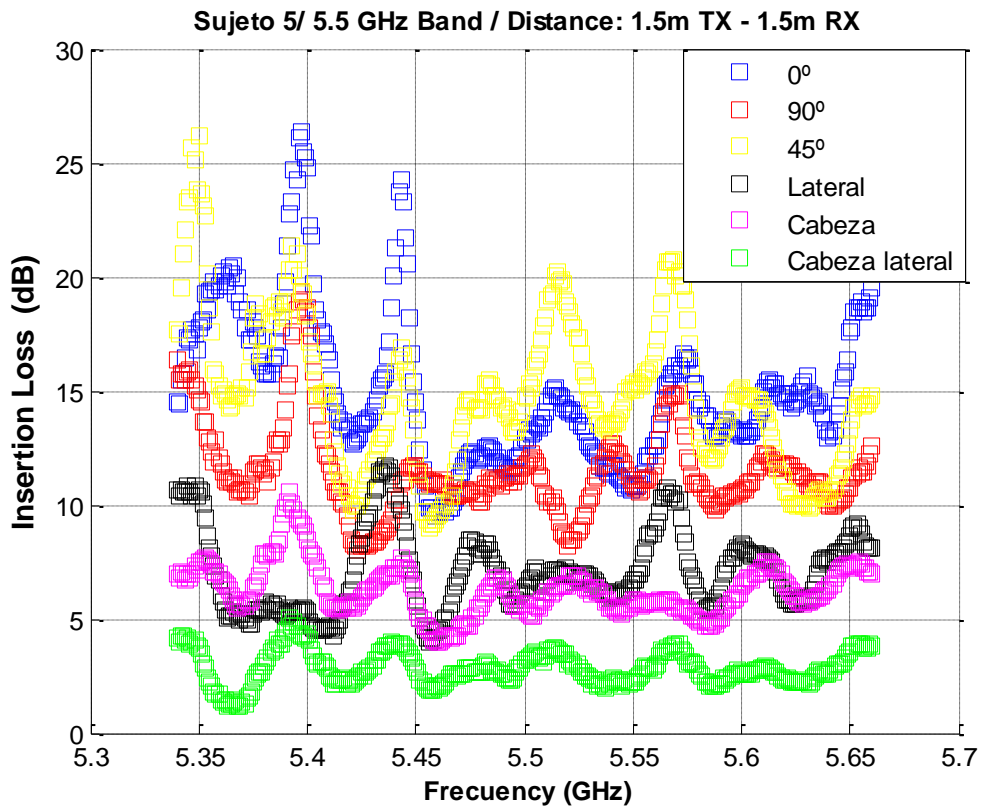


Figura 7.7.27: Caso A: Sujeto 5 en la banda 5.5 GHz

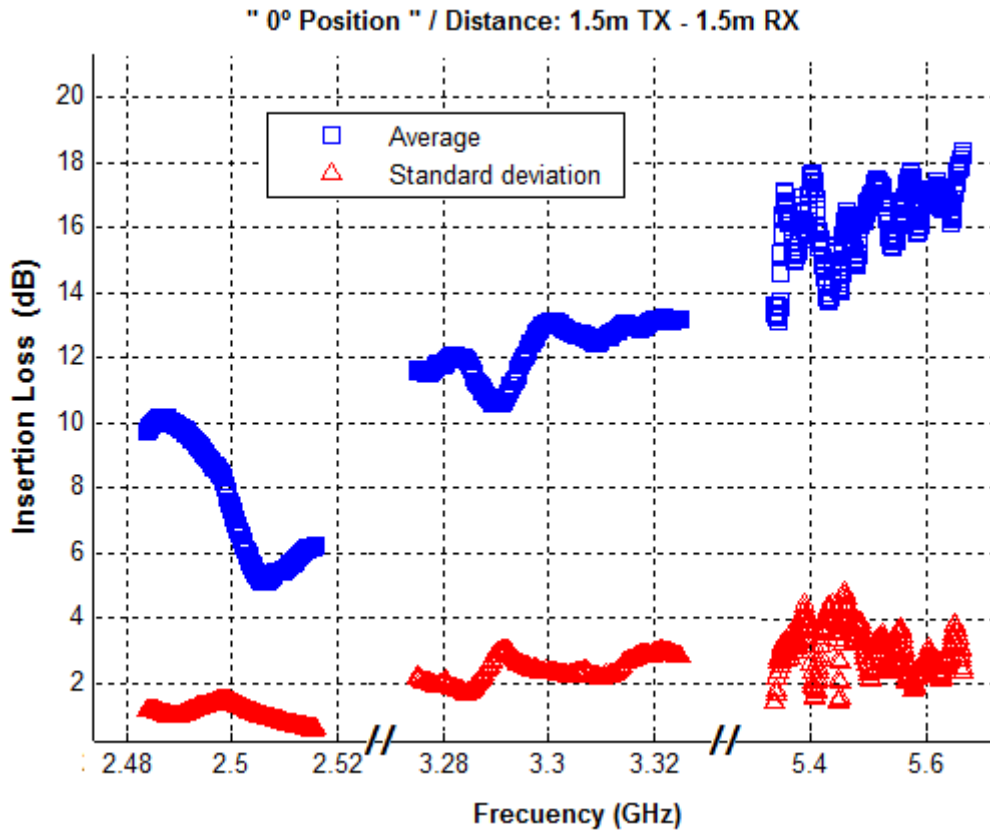


Figura 7.7.28: Caso A: Media y desviación en las tres bandas "Posición 0° "

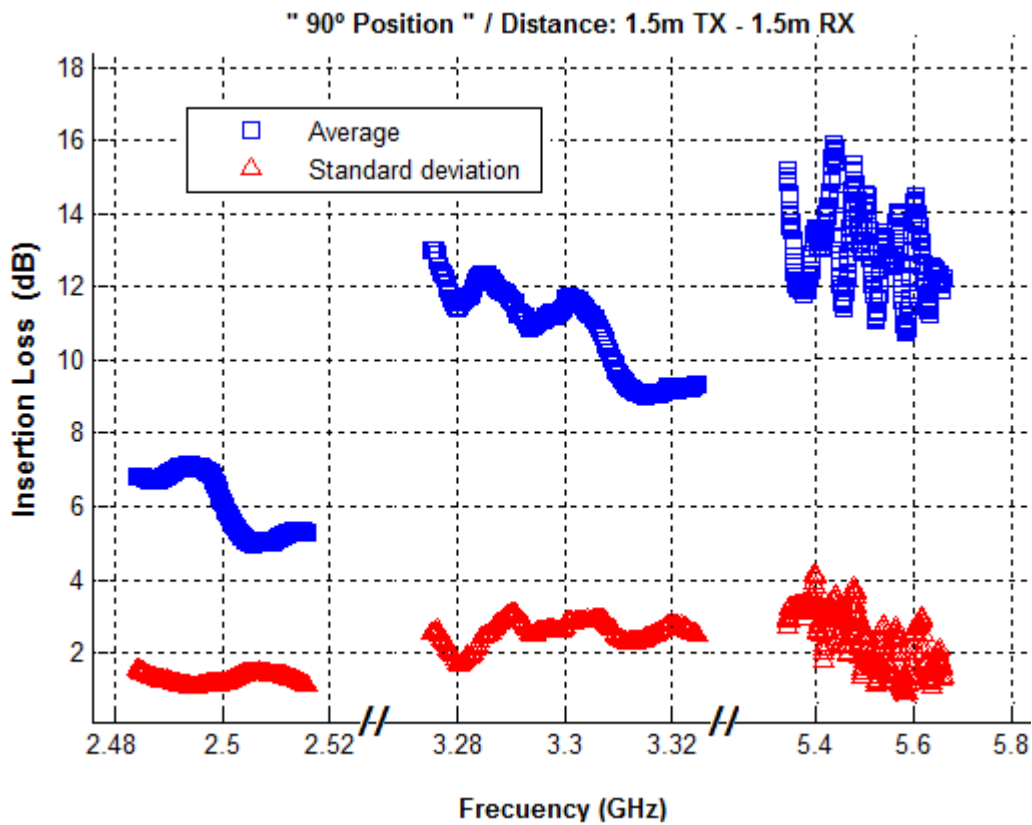


Figura 7.7.29: Caso A: Media y desviación en las tres bandas "Posición 90° "

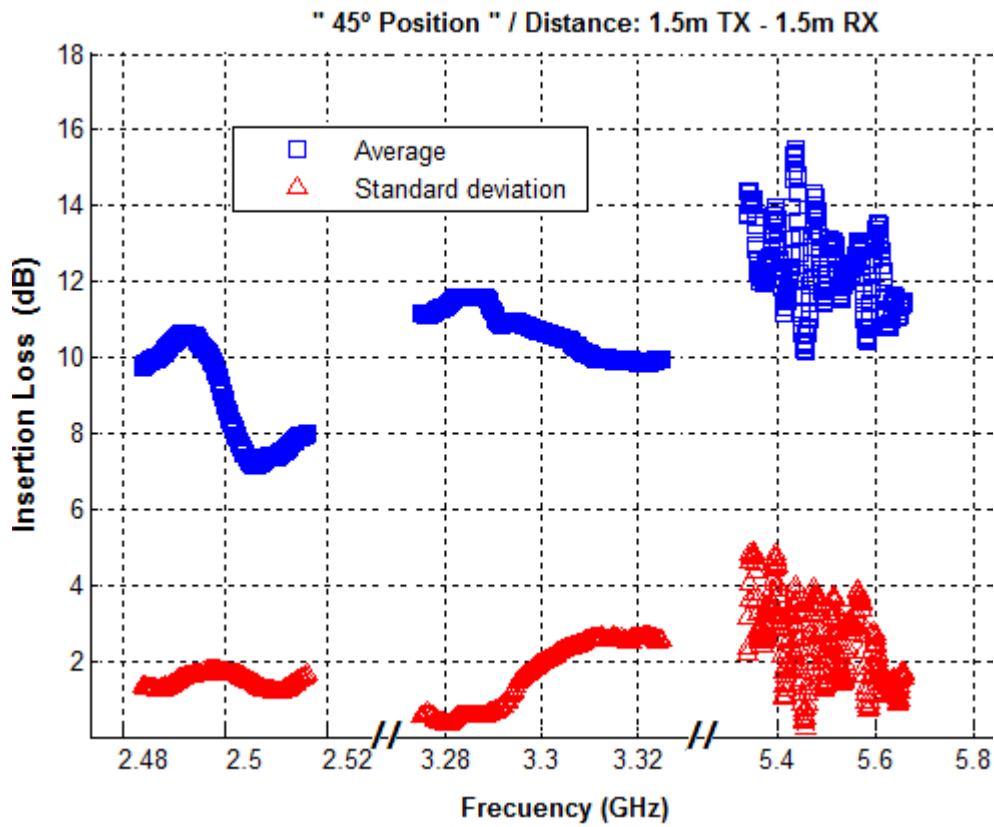


Figura 7.7.30: Caso A: Media y desviación en las tres bandas "Posición 45°"

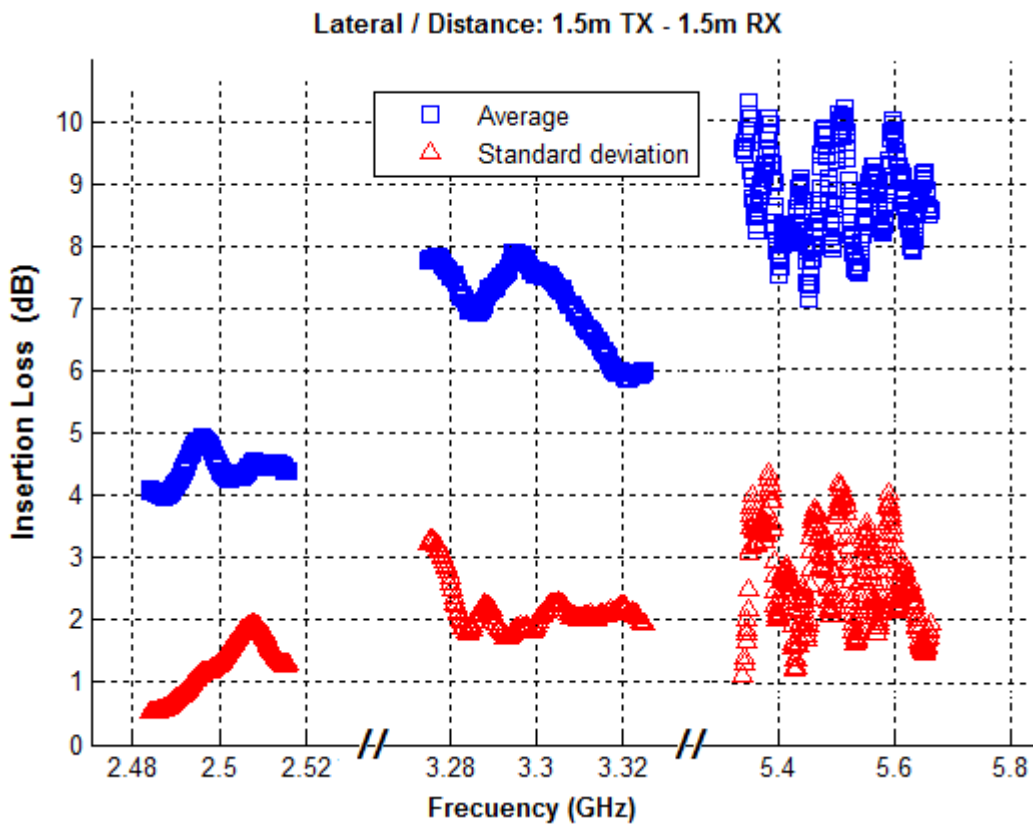


Figura 7.7.31: Caso A: Media y desviación en las tres bandas "Lateral"

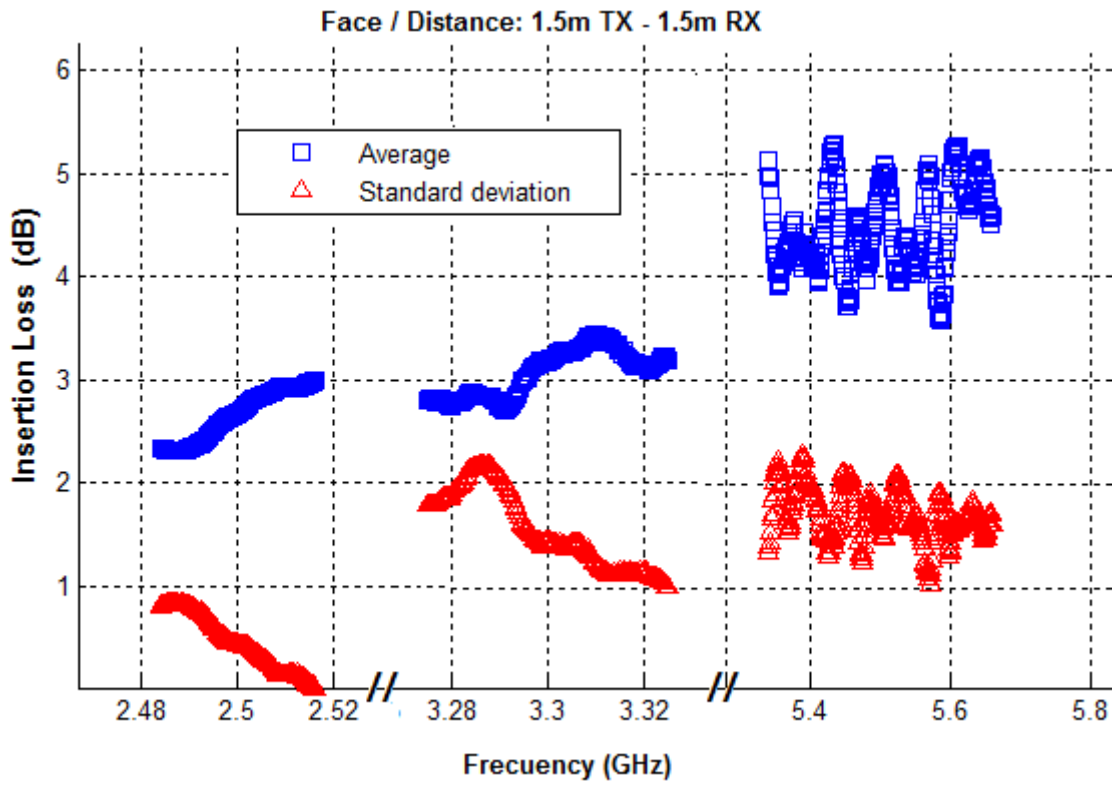


Figura 7.7.32: Caso A: Media y desviación en las tres bandas “Cara”

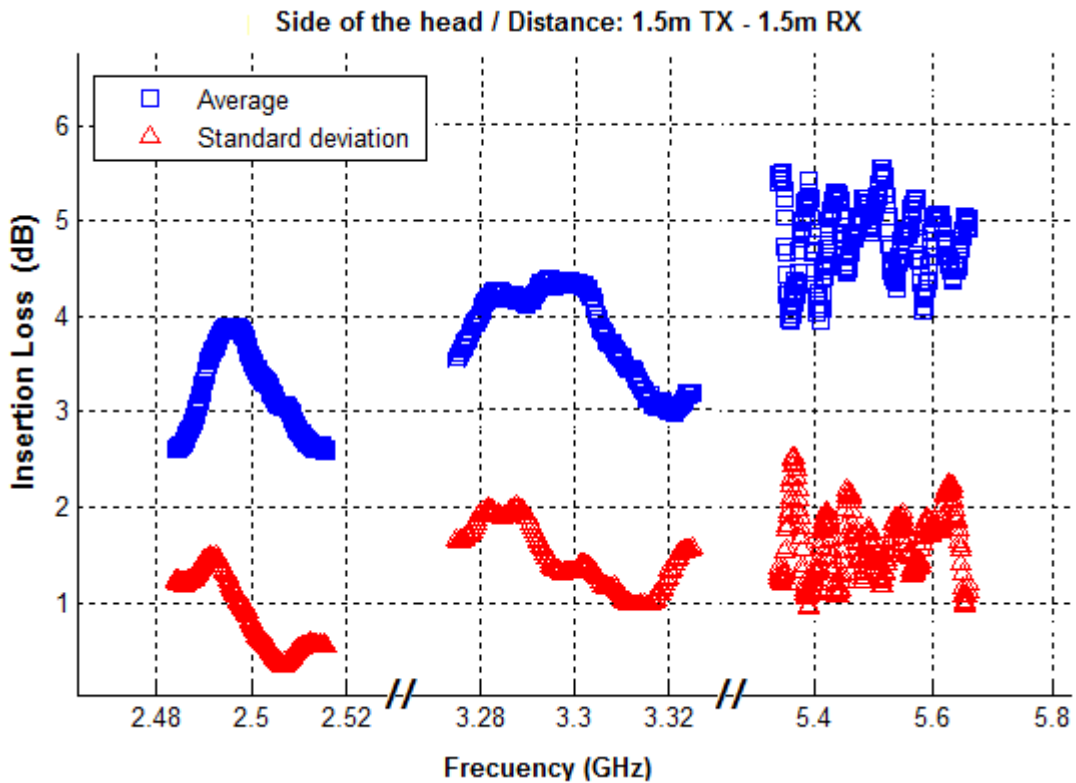


Figura 7.7.33: Caso A: Media y desviación en las tres bandas “Lateral de la cabeza”

- Caso B: En este caso vamos a exponer las medidas realizadas en las tres bandas de frecuencia para las diferentes posiciones y zonas anteriormente descritas para dos sujetos, uno detrás del otro. Es decir, entre antena transmisora y receptora el único obstáculo que se interpone son los dos sujetos en conjunto, con una separación entre ellos de 40 cm.

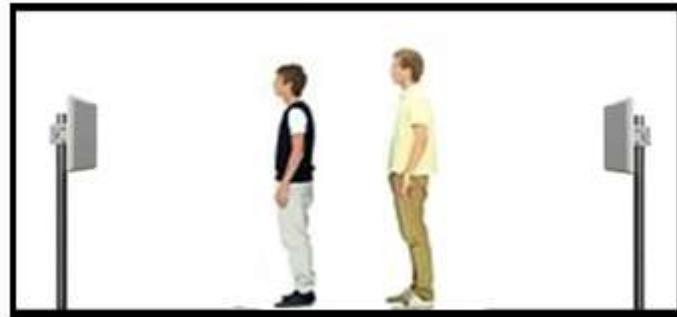


Figura 7.7.34: Caso B: Dos sujetos, uno detrás del otro, como obstáculo

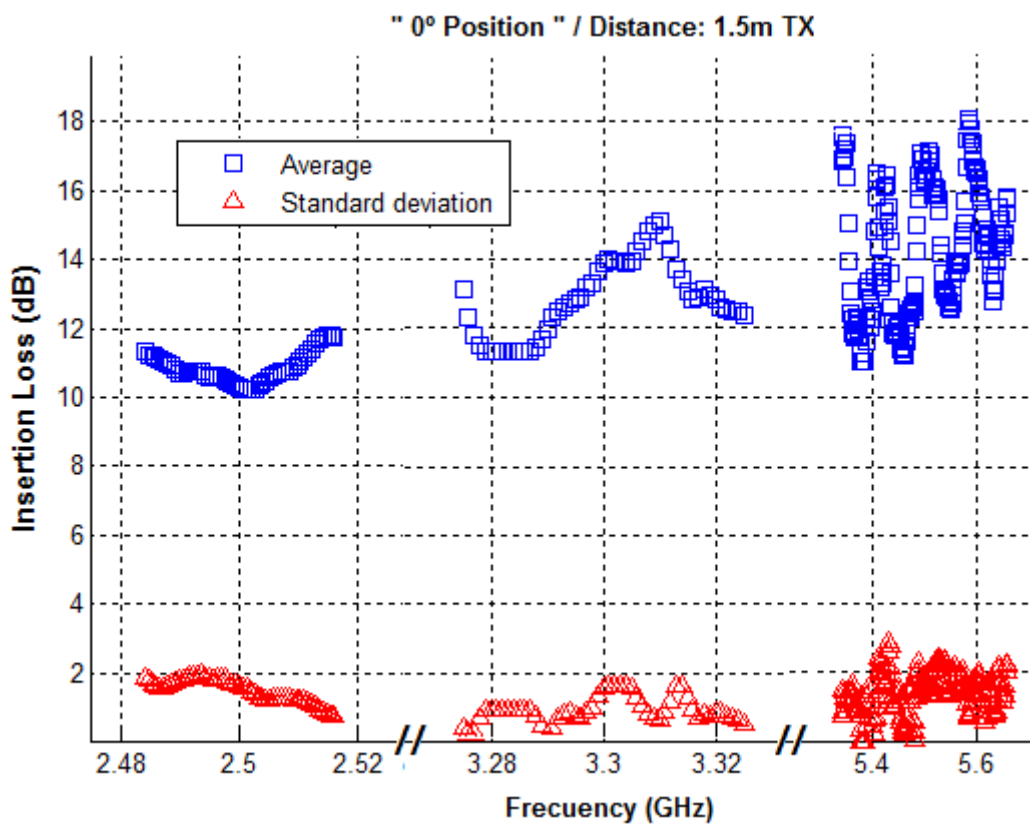


Figura 7.7.35: Caso B: Media y desviación en las tres bandas " Posición 0° "

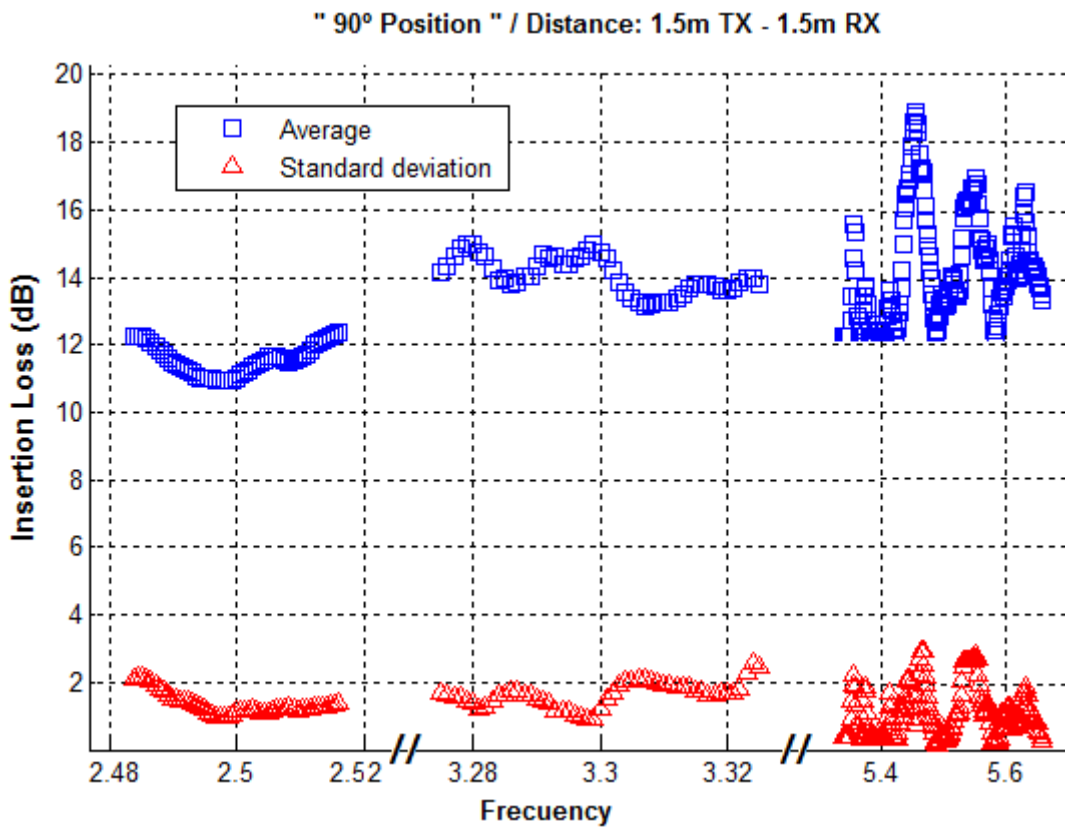


Figura 7.7.36: Caso B: Media y desviación en las tres bandas “ Posición 90° ”

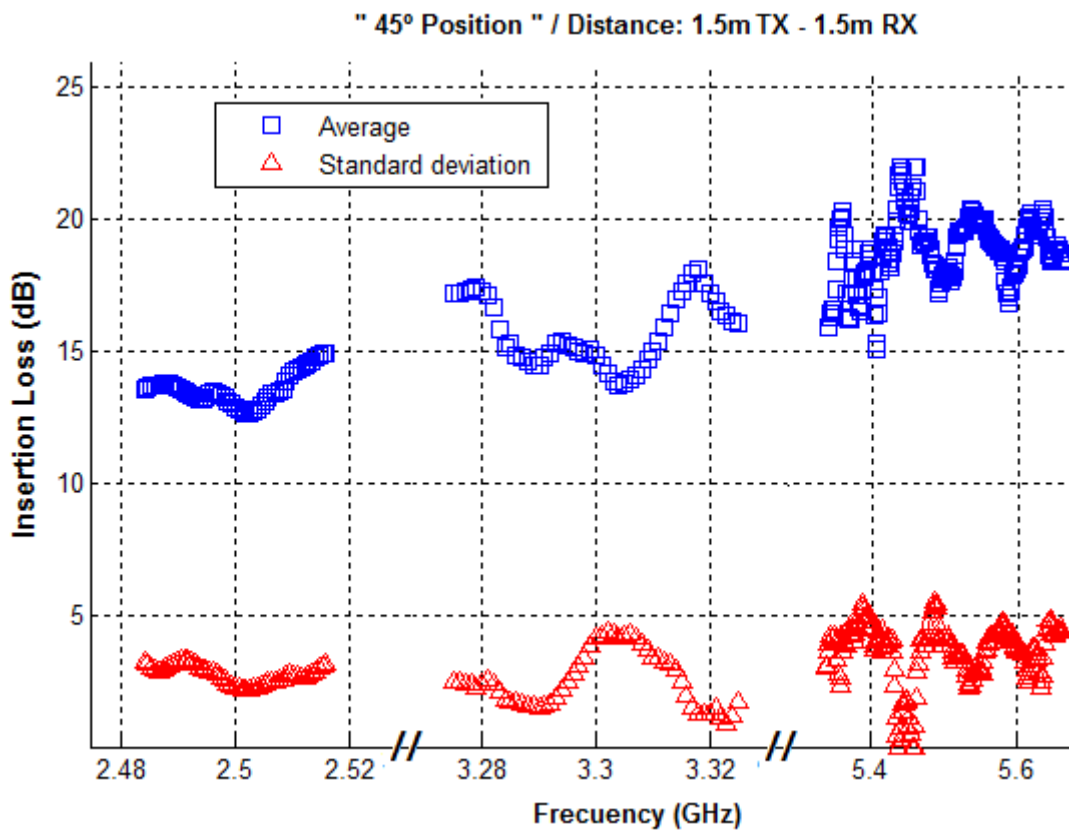


Figura 7.7.37: Caso B: Media y desviación en las tres bandas “ Posición 45° ”

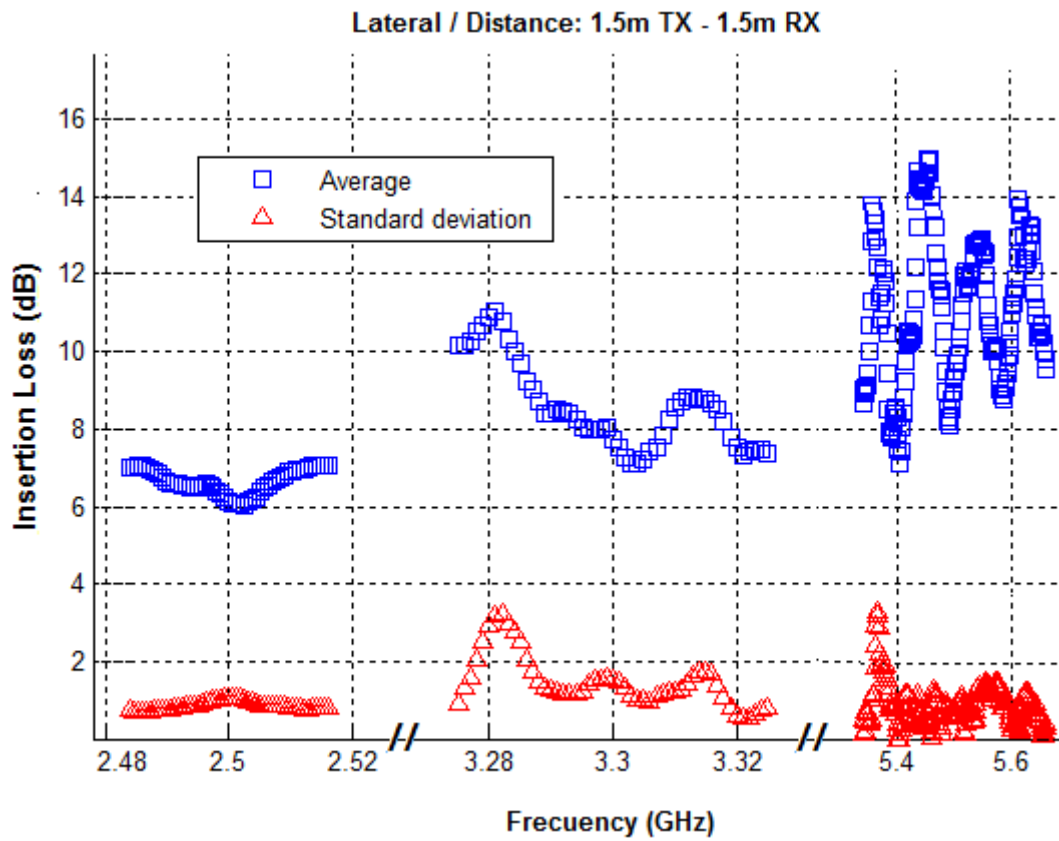


Figura 7.7.38: Caso B: Media y desviación en las tres bandas “Lateral”

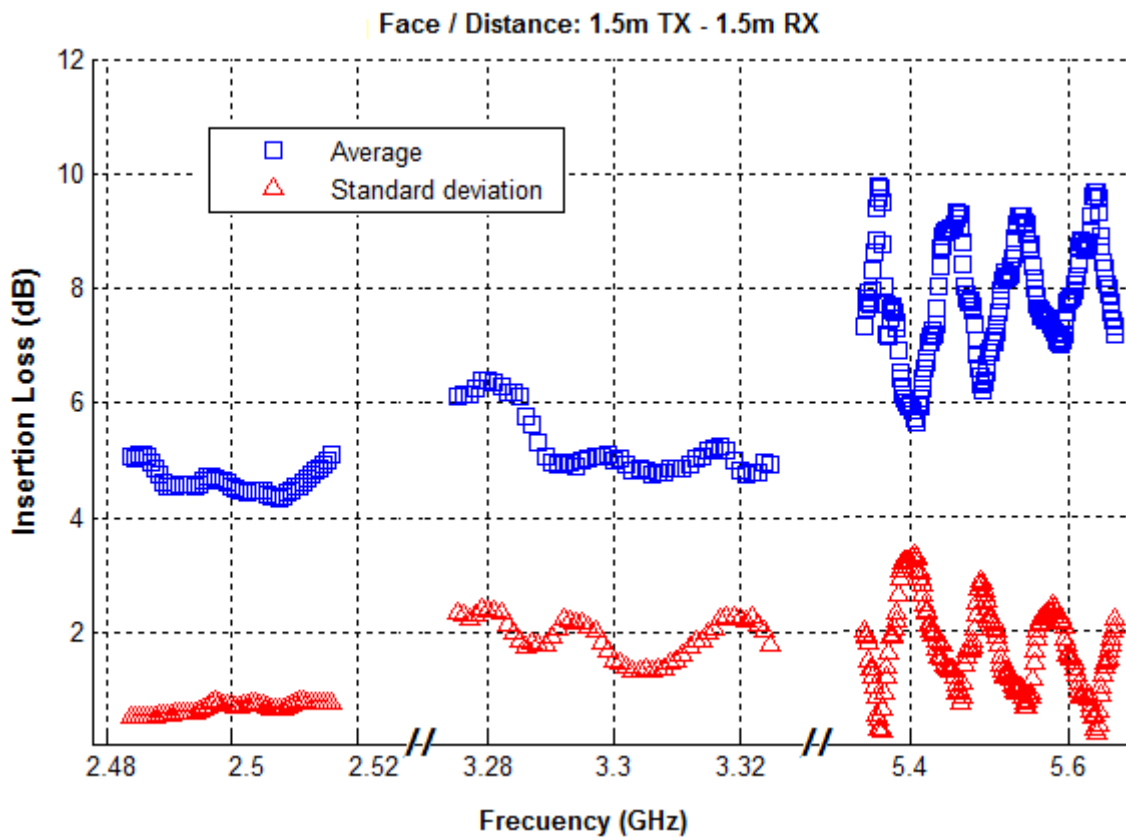


Figura 7.7.39: Caso B: Media y desviación en las tres bandas “Cara”

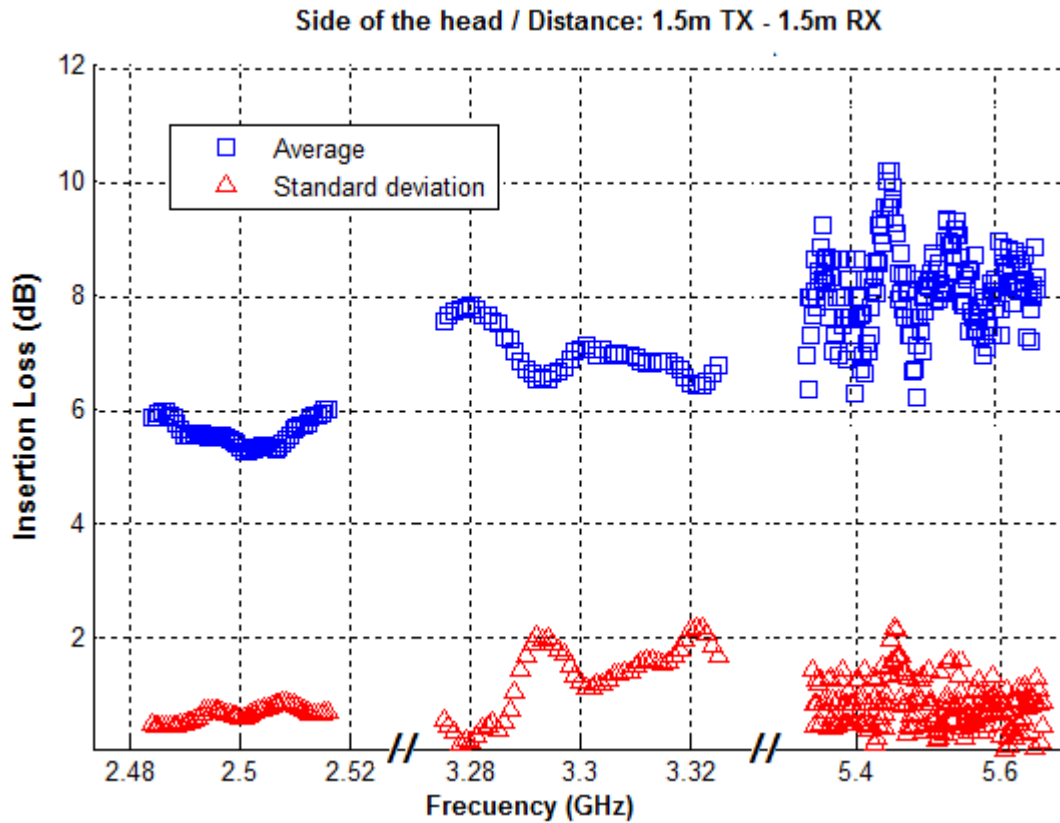


Figura 7.7.37: Caso B: Media y desviación en las tres bandas “Lateral de la cabeza”

- Caso C: En este último caso vamos exponer las medidas realizadas en las tres bandas de frecuencia en la “Posición 0º” para tres sujetos, uno al lado del otro. Es decir, entre antena transmisora y receptora el único obstáculo que se interpone son tres sujetos en conjunto, tal y como se observa en la imagen:



Figura 7.7.41: Caso B: Tres sujetos, uno al lado del otro, como obstáculo

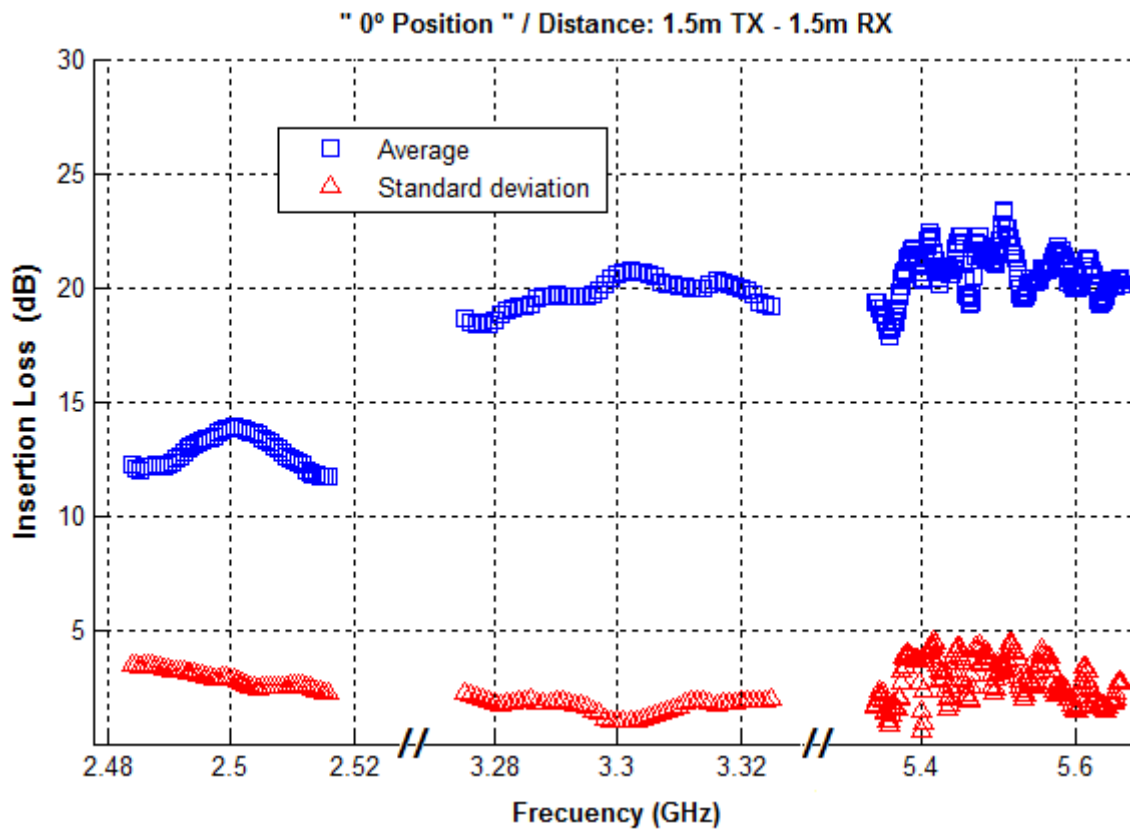


Figura 7.7.42: Caso C: Media y desviación en las tres bandas " Posición 0° "

7.7.4 Conclusiones

Como se comentó anteriormente, el ser humano está compuesto casi en su totalidad por agua, y por lo tanto la absorción de ondas electromagnéticas va a ser alto, y esto se traduce a pérdidas de inserción considerables en un radioenlace. Por este motivo cuando se quiere establecer un enlace, donde la aglomeración de gente puede llegar a ser alta, hay que prevenir las pérdidas de señal que se pueden producir en el caso de que en ese recinto existan personas.

Los resultados obtenidos cuando se interpone en el radioenlace solo una persona, son los siguientes:

- Para bandas de frecuencias situadas en 2.4 GHz las pérdidas de inserción son:
 1. Posición 0°: entre 6 – 10 dB
 2. Posición 90°: entre 5.5 – 6.5 dB
 3. Posición 45°: entre 7.5 – 11 dB
 4. Lateral: entre 4 – 5 dB
 5. Cara: entre 2 – 3 dB
 6. Lateral de la cabeza: entre 3 – 4 dB

- Para bandas de frecuencias situadas en 3.3 GHz las pérdidas de inserción son:
 1. Posición 0°: entre 11 – 13 dB
 2. Posición 90°: entre 9 – 12 dB
 3. Posición 45°: entre 10– 12 dB
 4. Lateral: entre 6 – 8 dB
 5. Cara: entre 3 – 3.5 dB
 6. Lateral de la cabeza: entre 3 – 4.5 dB

- Para bandas de frecuencias situadas en 5.5 GHz las pérdidas de inserción son:
 1. Posición 0°: entre 14 – 18 dB
 2. Posición 90°: entre 11 – 16 dB
 3. Posición 45°: entre 10 – 15 dB
 4. Lateral: entre 7 – 9.5 dB
 5. Cara: entre 4 – 5 dB
 6. Lateral de la cabeza: entre 4 – 5.5 dB

Los resultados obtenidos cuando se interpone en el radioenlace dos personas una detrás de la otra, son los siguientes:

- Para bandas de frecuencias situadas en 2.4 GHz las pérdidas de inserción son:
 1. Posición 0°: entre 10 – 12 dB
 2. Posición 90°: entre 11 – 12 dB
 3. Posición 45°: entre 13 – 15 dB
 4. Lateral: entre 6 – 7 dB
 5. Cara: entre 5 dB
 6. Lateral de la cabeza: entre 5 – 6 dB

- Para bandas de frecuencias situadas en 3.3 GHz las pérdidas de inserción son:
 1. Posición 0°: entre 11 – 15 dB
 2. Posición 90°: entre 13 – 15 dB
 3. Posición 45°: entre 15– 17 dB
 4. Lateral: entre 7 – 11 dB
 5. Cara: entre 5 – 6 dB
 6. Lateral de la cabeza: entre 6.5 – 8 dB

- Para bandas de frecuencias situadas en 5.5 GHz las pérdidas de inserción son:
 1. Posición 0°: entre 11 – 17 dB
 2. Posición 90°: entre 12 – 19 dB
 3. Posición 45°: entre 15 – 22 dB
 4. Lateral: entre 8 – 14 dB
 5. Cara: entre 6 – 10 dB
 6. Lateral de la cabeza: entre 6 – 10 dB

Los resultados obtenidos cuando se interpone en el radioenlace tres personas una al lado de otra en la "Posición 0°" son los siguientes:

- Para bandas de frecuencias situadas en 2.4 GHz las pérdidas de inserción son: 11 – 14 dB
- Para bandas de frecuencias situadas en 3.3 GHz las pérdidas de inserción son: 18 – 21 dB
- Para bandas de frecuencias situadas en 5.5 GHz las pérdidas de inserción son: 18 – 23 dB

Concluimos que las pérdidas a través del ser humano son destacables, y una posible aglomeración de personas podría producir grandes pérdidas de inserción en el enlace.

Sin embargo las pérdidas alrededor de la cabeza son mucho menores, pero tendrán que tenerse en cuenta cuando se quiera por ejemplo llamar por móvil por un terminal. Estos datos tienen que ser tomados en cuenta en el diseño de los terminales en relación a las antenas.

Otro aspecto a destacar es la desviación estándar producida, donde esta no supera en ninguna banda los 5 dB. Esta desviación es un poco alta debido a que cada persona posee diferentes tipos de anatomía y aspectos físicos, como altura, peso, cintura, etc. Por ello se decidió hacer medidas en diferentes tipos de personas, ya que estos análisis deben ser lo más generales posibles, de tal manera que se extraigan conclusiones para una persona estándar, y no particular.

7.8 Escenario 8: Columna con enredadera

El octavo escenario que vamos a caracterizar es una columna estrecha rectangular de hormigón con una enredadera de abundantes hojas llamada Glicinia "Wisteria Sinensis". Este escenario está situado en una urbanización del barrio de Montecarmelo en Madrid.

7.8.1 Estructura, dimensiones y puntos de análisis



Figura 7.8.1 y 7.8.2: Diferentes vistas de la columna con enredadera

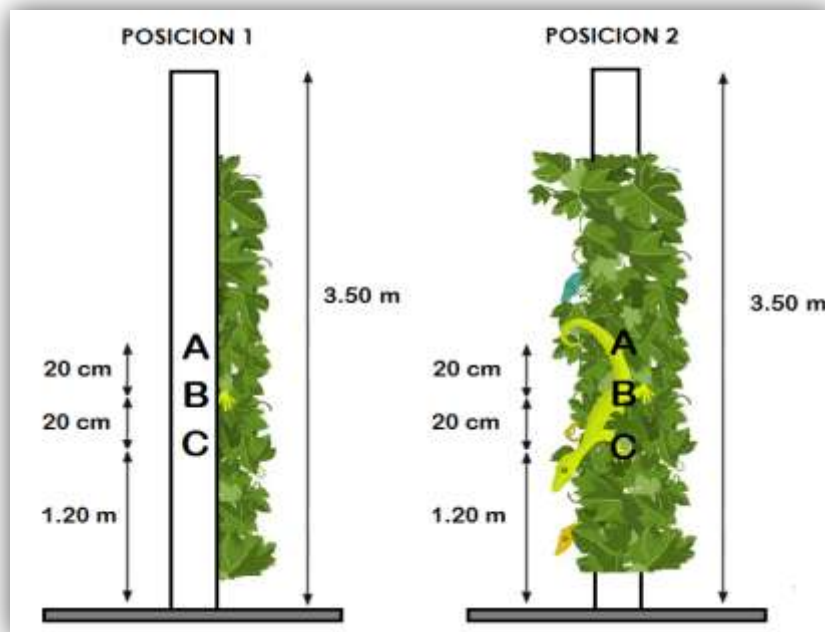


Figura 7.8.3 y 7.8.4: Dimensiones y puntos de análisis del escenario

7.8.2 Teoría aplicada: Modelización de la estructura

En este escenario se encuentra como obstáculo una columna rectangular estrecha construida con hormigón. Este tipo de material ya se ha caracterizado en anteriores estudios como el del escenario 2 (muro de ladrillo) o el del escenario 4 (columna de ladrillo), pero hay que señalar diferencias destacables con respecto a estos dos.

La columna no tiene una gran dimensión, es un obstáculo más bien estrecho, donde solo se pueden elegir tres puntos de interés en el medio de la columna dispuestos en línea: A, B y C.

Las pérdidas de inserción por penetración de la señal en este material no serán muy altas, con respecto al muro o a la columna, compuestas ambas de ladrillo y hormigón, pero hay que añadir un aspecto que lo hace destacable para su caracterización, y es la enredadera que se sitúa en una de las caras de la columna.

Al solo estar la enredadera en una de sus caras, el escenario en sí, lo hemos dividido en dos posiciones de medida, tal y como se muestra en la figura anterior. Describimos los dos tipos de posiciones que se han elegido para estudiar:

- **Posición 1:** La antena transmisora está orientada a una de las caras de la columna en la que no se encuentra la enredadera, dejando a su derecha la cara donde si está situada y en la que la podemos ver de perfil.
- **Posición 2:** La antena transmisora está orientada de tal manera que trasmite justo en frente de toda enredadera.

Dependiendo de la situación y posición de las antenas, y su orientación en el radioenlace, las hojas de la enredadera crearán diferentes efectos que serán útiles para el estudio. Por tanto vamos a realizar un análisis del escenario explicando los efectos teóricos que se producen en la señal, y que afectan a las pérdidas de inserción del obstáculo:

- **Dispersión:** Dependiendo de las dos posiciones anteriormente descritas, las hojas de la enredadera actuarán como dispersores de la señal, desviando la propagación en direcciones aleatorias y aumentando las pérdidas de inserción. También este aumento de pérdidas puede darse por absorción, ya que las hojas son elementos con índice de absorción a tener en cuenta.
- **Difracción:** Al ser una columna rectangular estrecha, en los laterales de la columna parte de la señal se va a ver difractada. Como explicamos en el “Capítulo 3”, en el tema de difracción, la señal va a “doblar esquinas” de la columna, donde la señal total recibida será una suma de la penetrada mas todas las señales difractadas.
- **Reflexión:** En la elección de los puntos de interés se ha tenido, no solo en cuenta la reflexión que podría ocurrir en los rayos emitidos al chocar con el suelo o con el techo del soportal, sino también por la altura en la que está situada la enredadera en la columna y existe más abundancia de hojas de la misma.

- **Distancia:** La colocación de las antenas con respecto al obstáculo es vital para una buena caracterización del escenario, donde, dependiendo de esta situación de la recepción con respecto a la columna, llegaran los rayos transmitidos difractados en diferente proporción a la antena receptora situada detrás de la columna. por ello se ha establecido la misma distancia entre la antena transmisora y la receptora con respecto al obstáculo dejando una distancia prudencial.

7.8.3 Resultados y análisis del escenario

- A continuación vamos exponer la medida y la desviación estándar en cada banda de frecuencia utilizada, para las posiciones 1 y 2 , y para los dos tipos de polarizaciones utilizadas

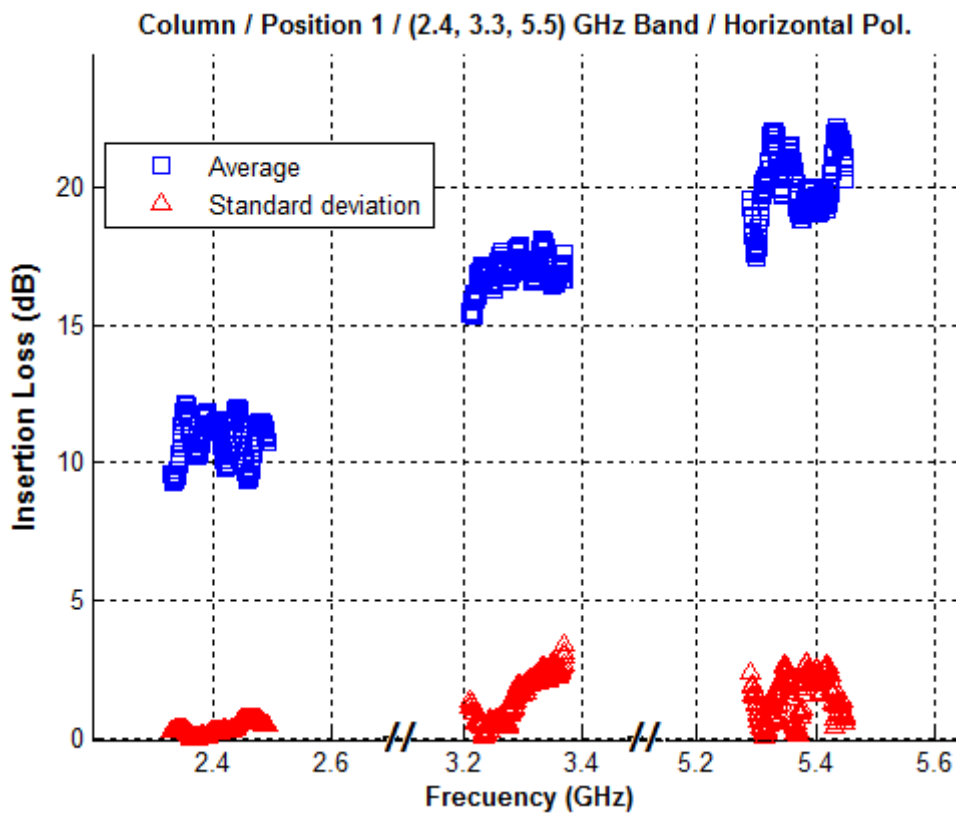


Figura 7.8.5: Media y desviación en las tres bandas, en la “Posición 1”, Polarización Horizontal

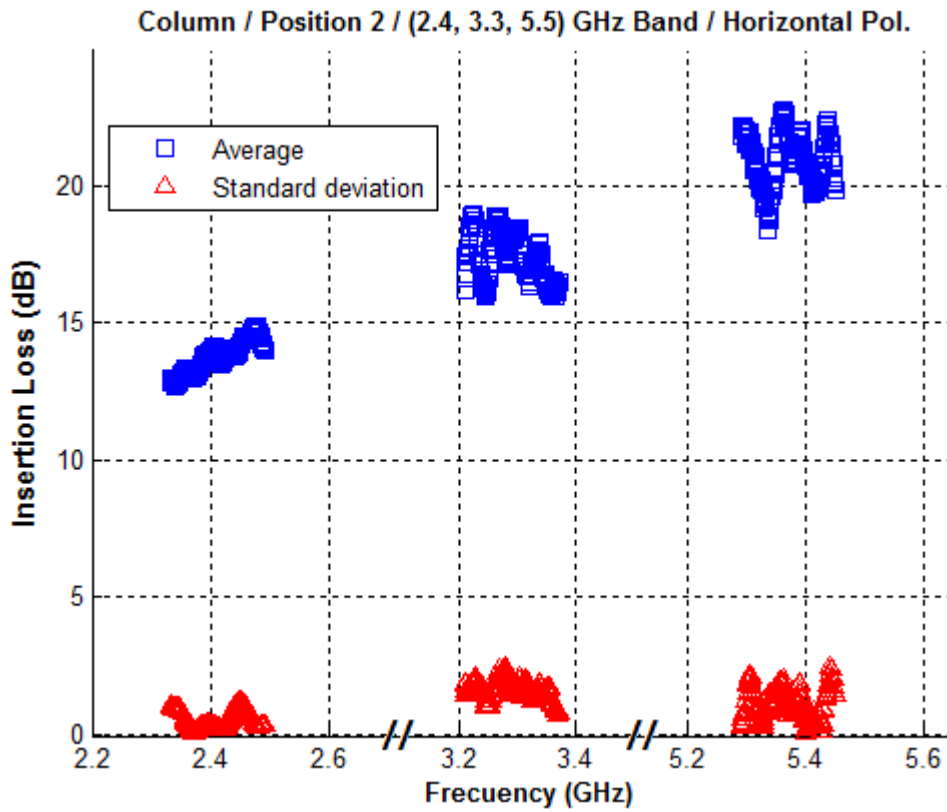


Figura 7.8.6: Media y desviación en las tres bandas, en la “Posición 2”, Polarización Horizontal

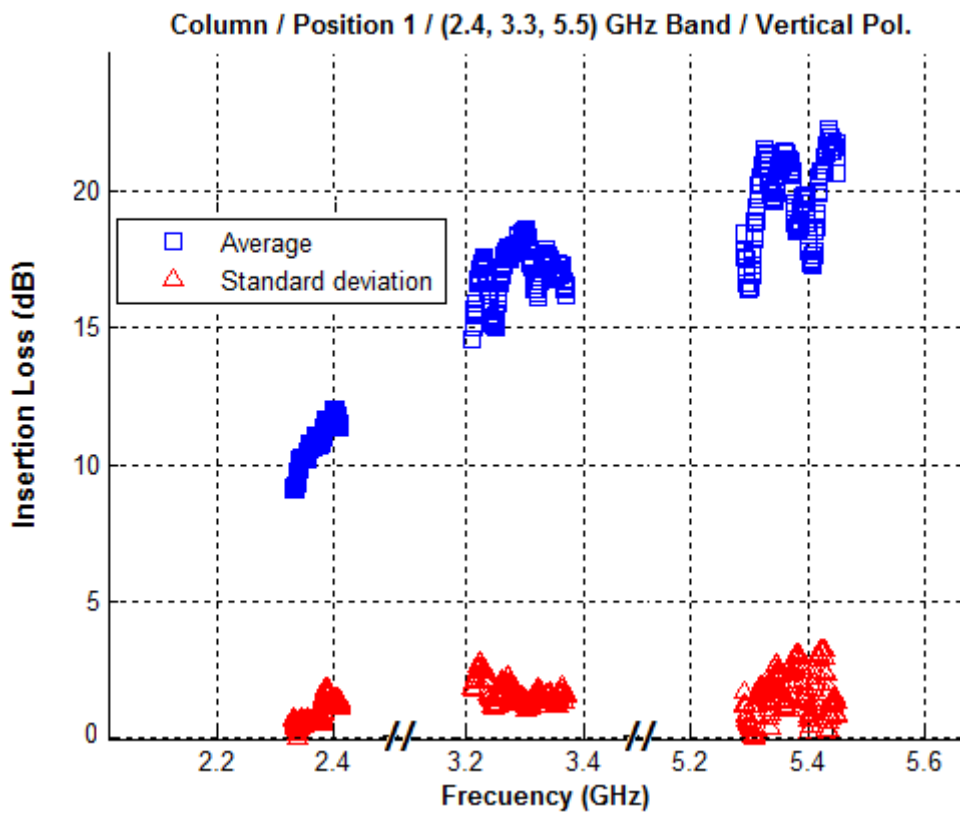


Figura 7.8.7: Media y desviación en las tres bandas, en la “Posición 1”, Polarización Vertical

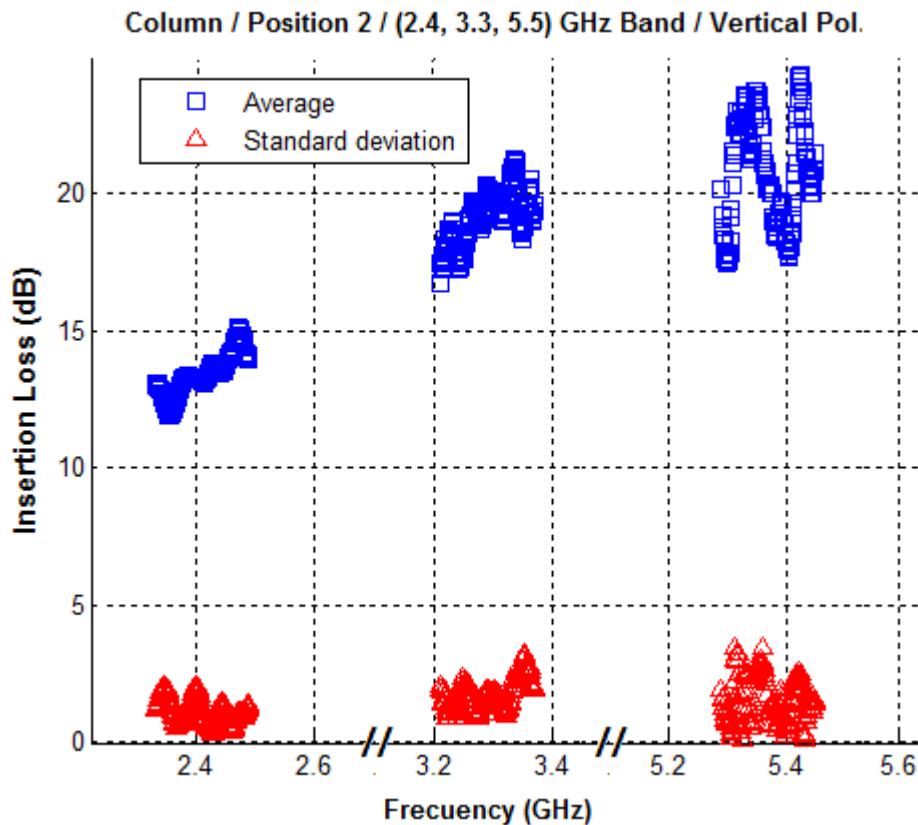


Figura 7.8.8: Media y desviación en las tres bandas, en la “Posición 2”, Polarización Vertical

- A continuación vamos a exponer de forma más visual, el nivel de pérdidas de inserción en cada punto de interés A, B, C, es decir, para a las diferentes alturas y zonas que se han estudiado es este escenario.

Cada grafica representará una banda de trabajo, donde en cada una de ellas se comparará las diferentes situaciones: “Posición 1” y “Posición 2”. También se apreciará en las medidas los dos tipos de polarizaciones utilizadas: Polarización Horizontal y Polarización Vertical.

Lo que se pretende con estas tres graficas siguientes, es poder observar adecuadamente las diferencias entre las “Posiciones 1 y 2”, y ver cómo afecta la disposición de las hojas de la enredadera en las pérdidas por dispersión de la señal.

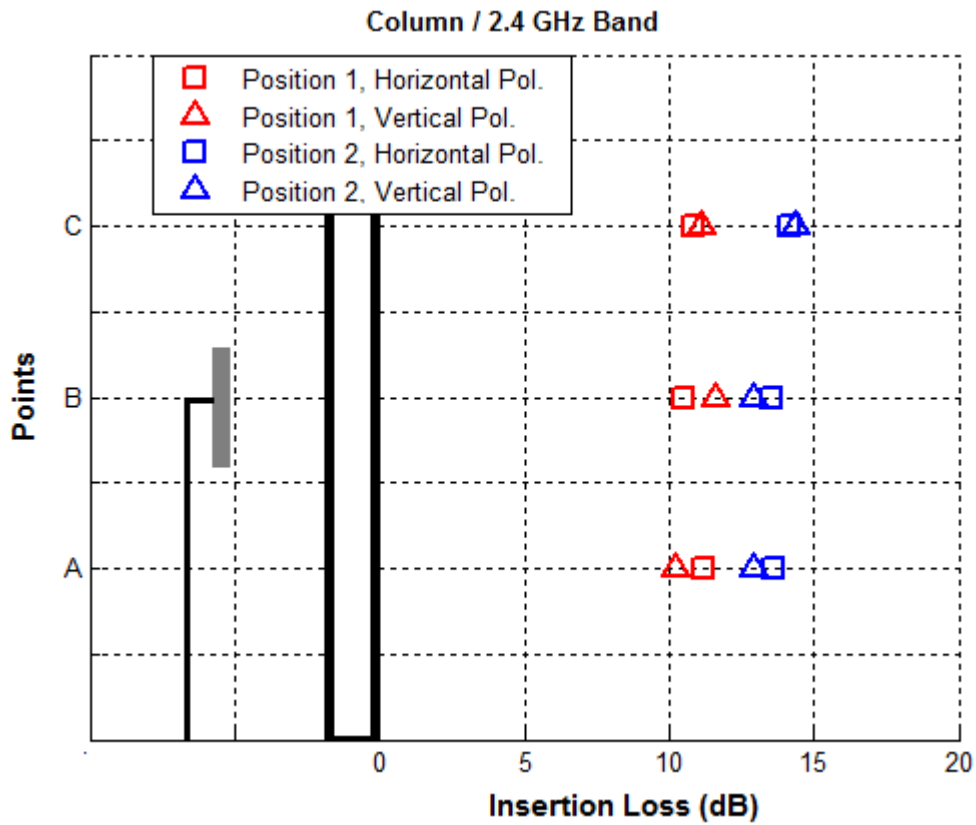


Figura 7.8.9: Medidas en cada punto para la banda de 2.4 GHz

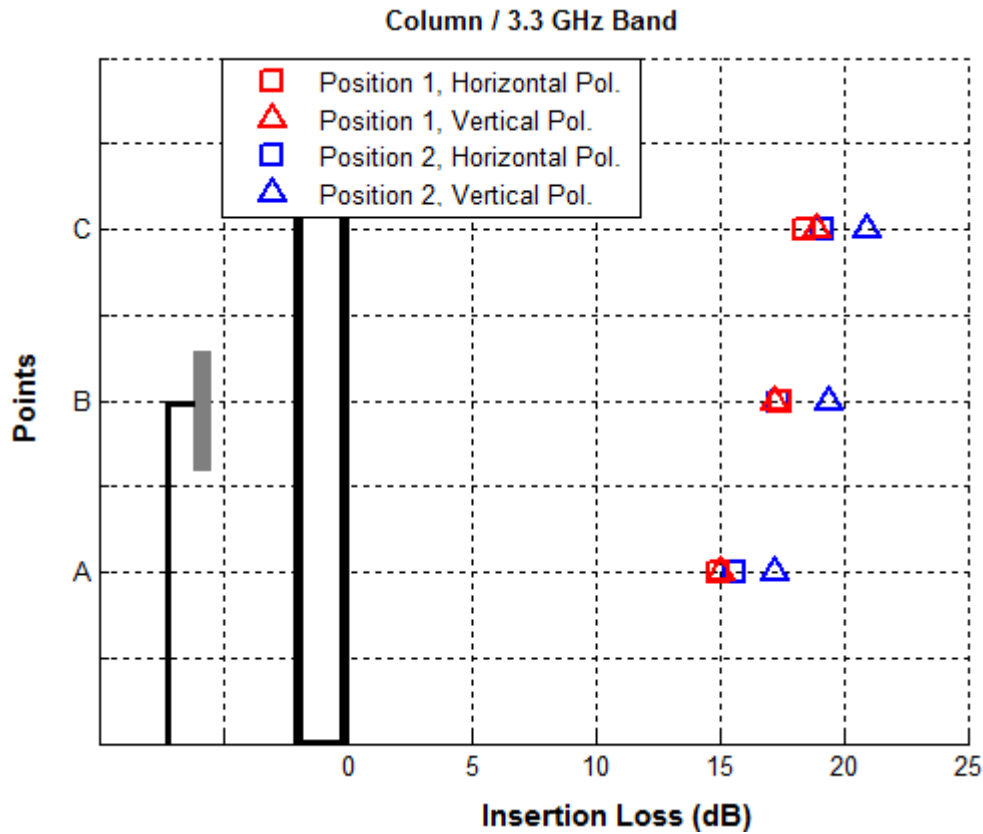


Figura 7.8.10: Medidas en cada punto para la banda de 3.3 GHz

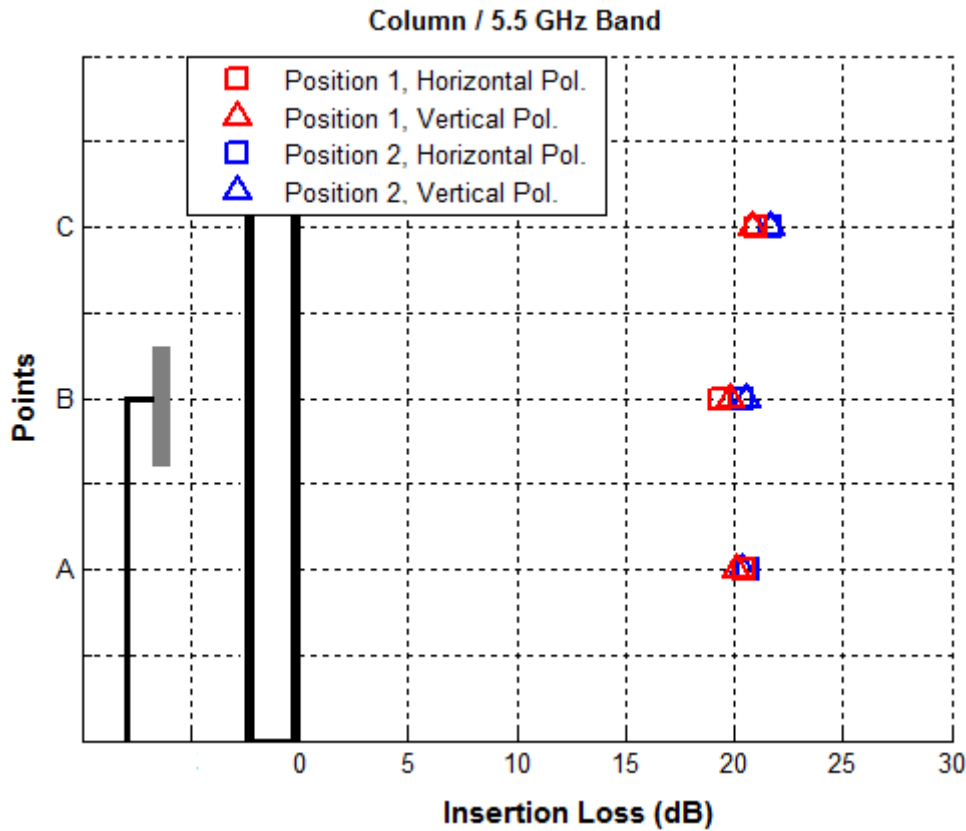


Figura 7.8.11: Medidas en cada punto para la banda de 5.5 GHz

- Por último vamos a volver a exponer de forma más visual, el nivel de pérdidas de inserción en cada punto de interés A,B,C , es decir, para a las diferentes alturas y zonas que se han estudiado es este escenario.

En este caso cada grafica representará un tipo de posición: “Posición 1” y “Posición 2”, donde en cada una de ellas se comparará los diferentes niveles de pérdidas de inserción para las tres bandas. También se apreciará en las medidas los dos tipos de polarizaciones utilizadas: Polarización Horizontal y Polarización Vertical.

Lo que se pretende con estas dos graficas siguientes, es analizar los cambios en el nivel de pérdidas cuando se va aumentando de frecuencia.

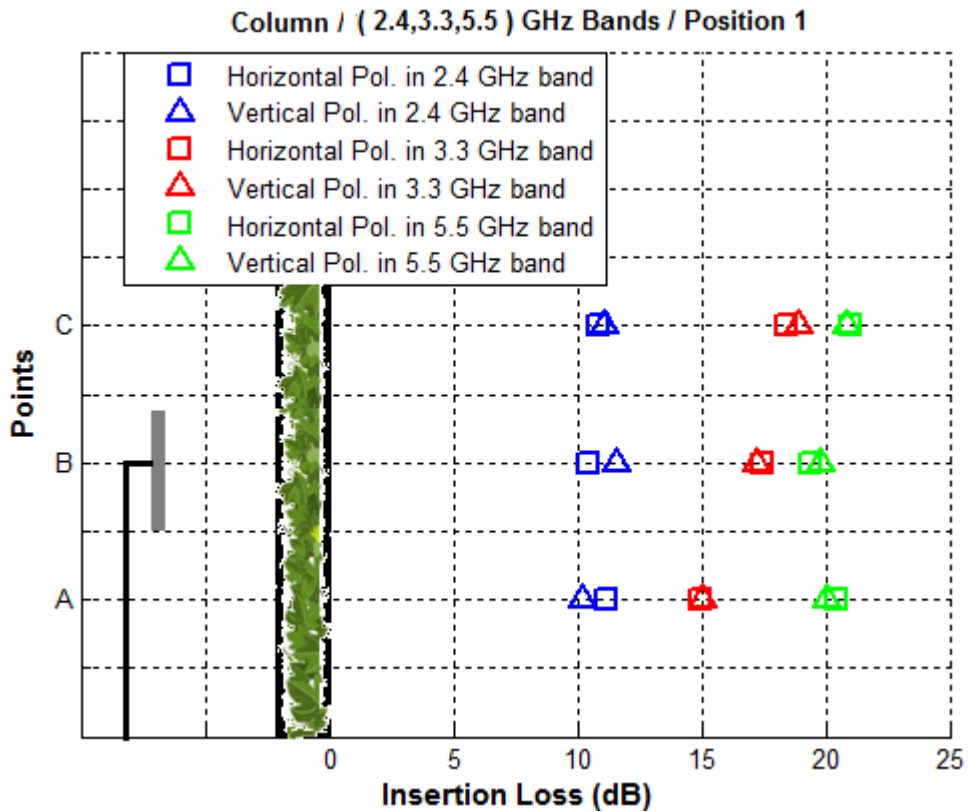


Figura 7.8.12: Medidas en las tres bandas para la “Posición 1”

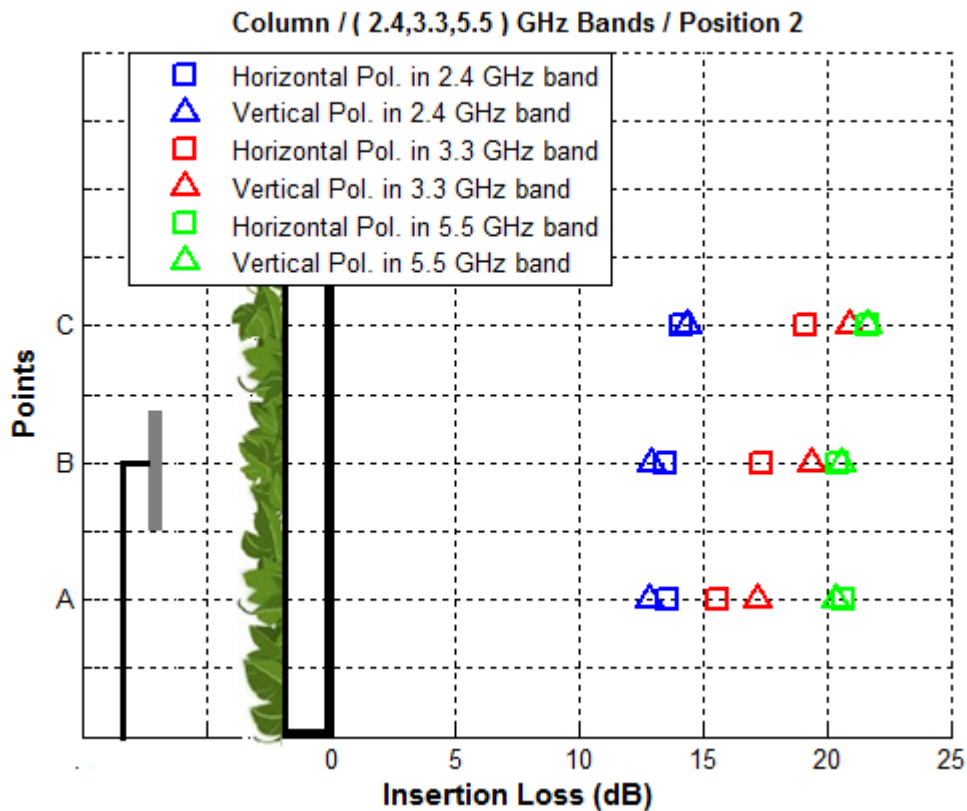


Figura 7.8.13: Medidas en las tres bandas para la “Posición 2”

7.8.4 Conclusiones

Las pérdidas de inserción por penetración de la señal en este material no han sido igual de altas respecto al muro o la columna analizadas anteriormente, los cuales compartían materiales similares a este obstáculo. Que se han más bajas que estos escenarios, se debe en cierta medida por la dimensión de la columna, la cual es mucho más estrecha y no está compuesta por ladrillo. Pero al situarse una enredadera en una de las caras de la columna, las pérdidas se mantienen destacables, ya que esta enredadera aumenta las pérdidas por dispersión en sus hojas. Como se ha explicado anteriormente la enredadera ofrecerá diferentes efectos en las posiciones elegidas para este escenario. De tal manera que en:

– **Posición 1:** La antena transmisora está orientada a una de las caras de la columna en la que no se encuentra la enredadera, dejando a su derecha la cara donde si está situada y en la que la podemos ver de perfil. Esto ha supuesto diferentes difracción en la columna, donde en un lateral será la típica difracción en un obstáculo rectangular y en la otra cara una difracción afectada en gran medida por la dispersión de las hojas

Los datos obtenidos son los siguientes:

- Para bandas de frecuencias situadas en 2.4 GHz las pérdidas de inserción obtenidas en los puntos rondan los 10 – 12 dB.
- Para bandas de frecuencias situadas en 3.3 GHz las pérdidas de inserción obtenidas en los puntos rondan los 15 – 18 dB.
- Para bandas de frecuencias situadas en 5.5 GHz las pérdidas de inserción obtenidas en los puntos rondan los 19 – 20 dB.

– **Posición 2:** La antena transmisora está orientada de tal manera que trasmite justo en frente de toda enredadera. Esto supone una dispersión completa al emitir la onda principal donde la difracción en las dos caras se verá afectada.

Los datos obtenidos son los siguientes:

- Para bandas de frecuencias situadas en 2.4 GHz las pérdidas de inserción obtenidas en los puntos rondan los 13 – 15 dB.
- Para bandas de frecuencias situadas en 3.3 GHz las pérdidas de inserción obtenidas en los puntos rondan los 16 – 21 dB.
- Para bandas de frecuencias situadas en 5.5 GHz las pérdidas de inserción obtenidas en los puntos rondan los 21 – 22 dB.

Se observa que en la “Posición 2” existen más pérdidas porque los rayos posibles que se deberían haber difractado en la columna, y hubieran contribuido a la señal principal bajando el nivel de pérdidas producidas, han sido dispersados por las hojas de la enredadera.

7.9 Escenario 9: Árbol

Este escenario que vamos a caracterizar es un árbol estándar cuyo nombre específico de especie es Cinamomo, "Melia Azedarach". Este escenario está situado en un parque del barrio de Montecarmelo en Madrid.

7.9.1 Primer Caso: "Con Hojas". Estructura, dimensiones y puntos de análisis



Figura 7.9.1 y 7.9.2: Diferentes vistas del árbol con hojas

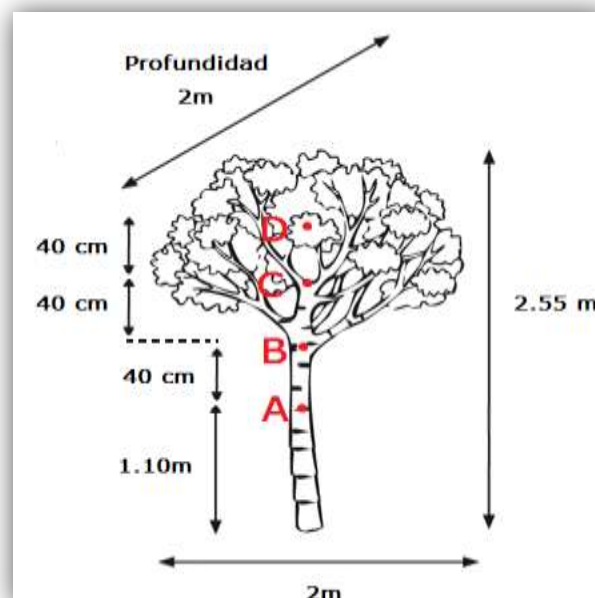


Figura 7.9.3 y 7.9.4: Dimensiones y puntos de análisis del escenario

7.9.2 Teoría aplicada: Modelización de la estructura

El modelo utilizado es el dado por la recomendación ITU R-REC-P.833. [23]

Este modelo se aplica para simular la obstrucción por un solo obstáculo vegetal a poco metros de distancia, con una frecuencia por encima de 1 GHz. Para realizar una estimación de las pérdidas totales, el modelo genérico combina los efectos de los siguientes modos individuales de propagación

- Componente difractada por la parte superior de la vegetación

Las pérdidas de difracción, “ L_{top} ”, experimentadas por el trayecto de la señal difractada por la vegetación, pueden considerarse como una difracción en arista en filo de cuchillo aislada doble con la geometría representada en la siguiente figura. [24]

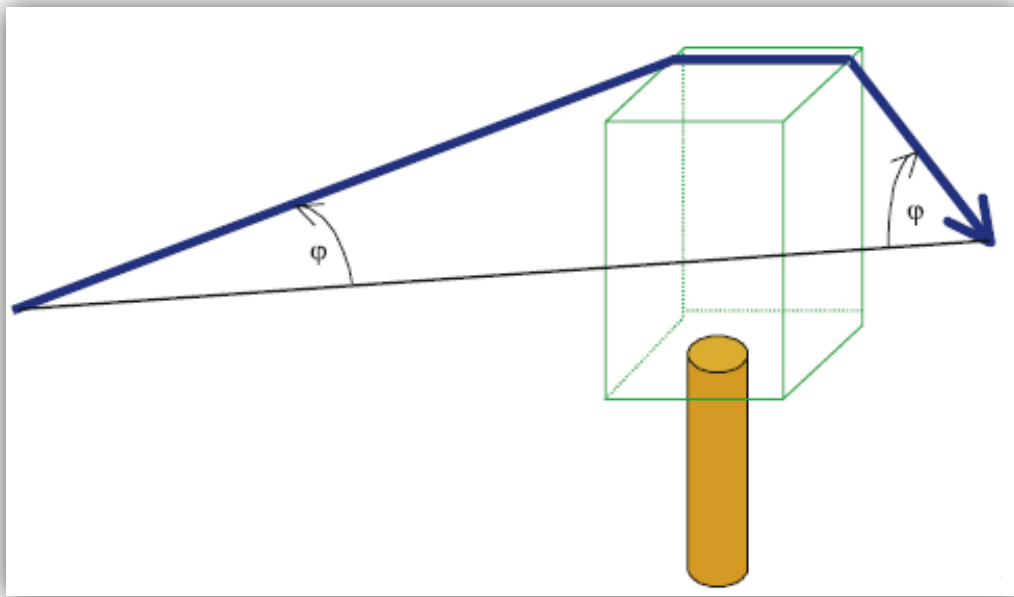


Figura 7.9.5: 1º Modelo de difracción en arista en filo de cuchillo aislada doble

- Componente difractada lateral

Las pérdidas de difracción, “ L_{sidea} ” y “ L_{sideb} ”, experimentadas por la señal difractada en torno a la vegetación pueden tratarse nuevamente como una difracción en arista en filo de cuchillo aislada doble. [24]

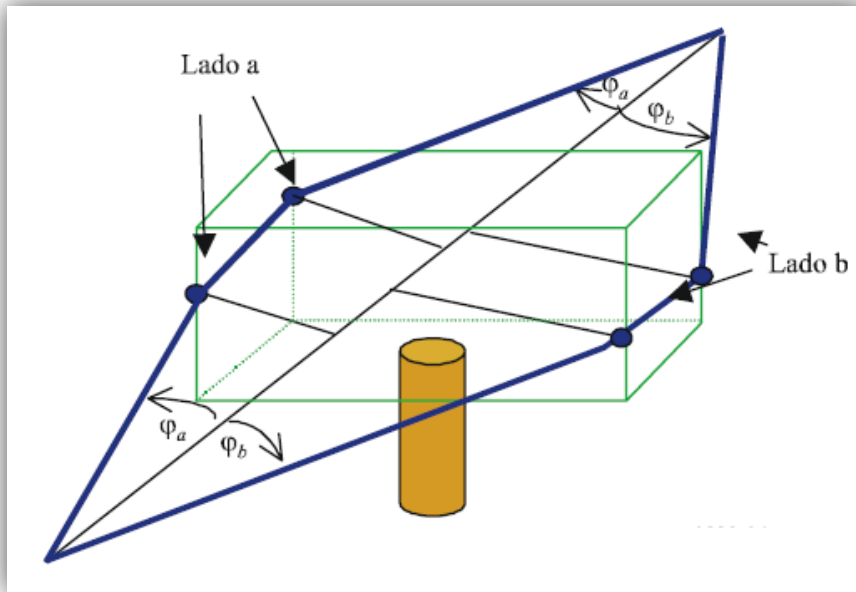


Figura 7.9.6: 2º Modelo de difracción en arista en filo de cuchillo aislada doble

- Componente reflejada en el suelo

Se supone que el trayecto es lo suficientemente corto como para que la onda reflejada en el suelo pueda modelarse mediante la geometría ilustrada en la siguiente figura.

Para calcular las pérdidas “ L_{ground} ” experimentadas en el receptor por la onda reflejada en el suelo, puede determinarse el coeficiente de reflexión, R_0 , de la señal reflejada en el suelo con un determinado ángulo rasante, θ_g . [25]

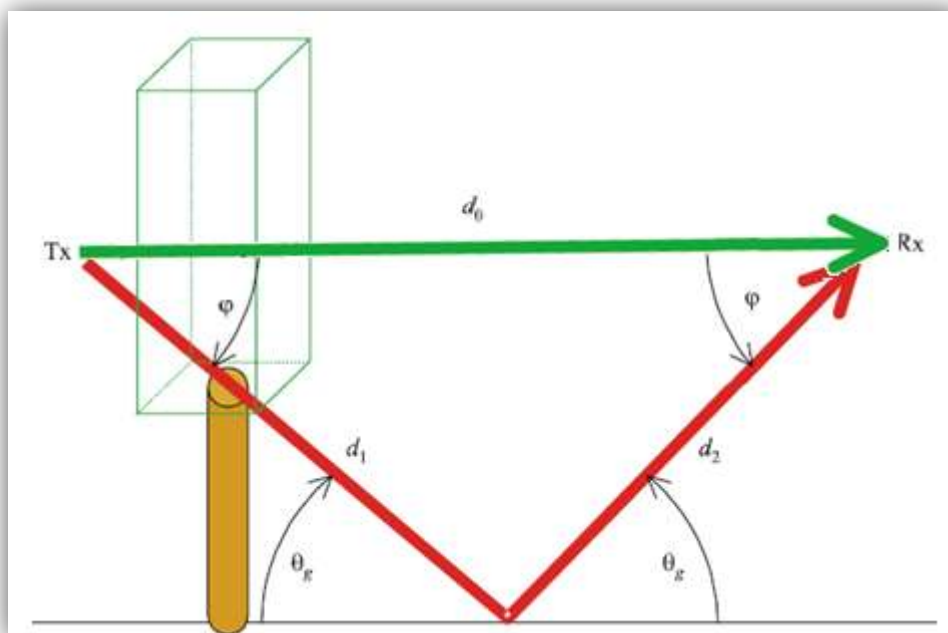


Figura 7.9.7: Modelo de Reflexionen el suelo

▪ **Componente que pasa a través de la vegetación o dispersada**

Para realizar predicciones precisas de la atenuación en exceso debida a la vegetación el usuario necesita partir de los siguientes parámetros:

- α : relación entre la potencia dispersada hacia adelante y la potencia total.
- β : anchura de haz de la función de fase (grados)
- $\sigma\tau$: coeficiente combinado de absorción y dispersión
- W : albedo
- γ_R : anchura de haz de la antena de recepción (grados)
- d : distancia a la vegetación (m).
- m : el orden del primer término L , no cambiará significativamente para $m > 10$
- τ : densidad óptica en función de la distancia z

Manejando todos estos parámetros, englobaríamos las pérdidas por scattering “ L_{scat} ”.

▪ **Pérdidas totales como combinación de los componentes anteriores**

Las pérdidas totales, “ L_{total} ”, experimentadas por una señal que se propaga a través de árboles vienen dadas por la combinación de los fenómenos descritos anteriormente. Por tanto todas las pérdidas de inserción que nos encontramos en los árboles vienen dadas por la suma de las componentes, de tal manera que:

$$L_{total} = -10 \log_{10} \left\{ 10^{\left(\frac{-L_{sidea}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-L_{sideb}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-L_{top}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-L_{ground}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-L_{scat}}{10}\right)} \right\}$$

7.9.3 Resultados y análisis del escenario

- Para una buena caracterización del escenario, se ha procedido a la medición de los puntos de interés anteriormente descritos A, B, C y D, donde los puntos más bajos A y B se sitúan en la zona del tronco; mientras que los puntos C y D se sitúan en la zona de la copa del árbol.

En estos últimos, se han realizado mediciones para diferentes ángulos con respecto a la orientación habitual de 0° de la antena receptora, de tal manera que se pueda realizar un estudio más exhaustivo de la dispersión que causan las hojas del árbol en la propagación de las ondas electromagnéticas del radioenlace. Este modelo de análisis se ha escogido siguiendo los estudios realizados en la literatura.

[26]

Una figura ilustrativa del procedimiento es la siguiente:

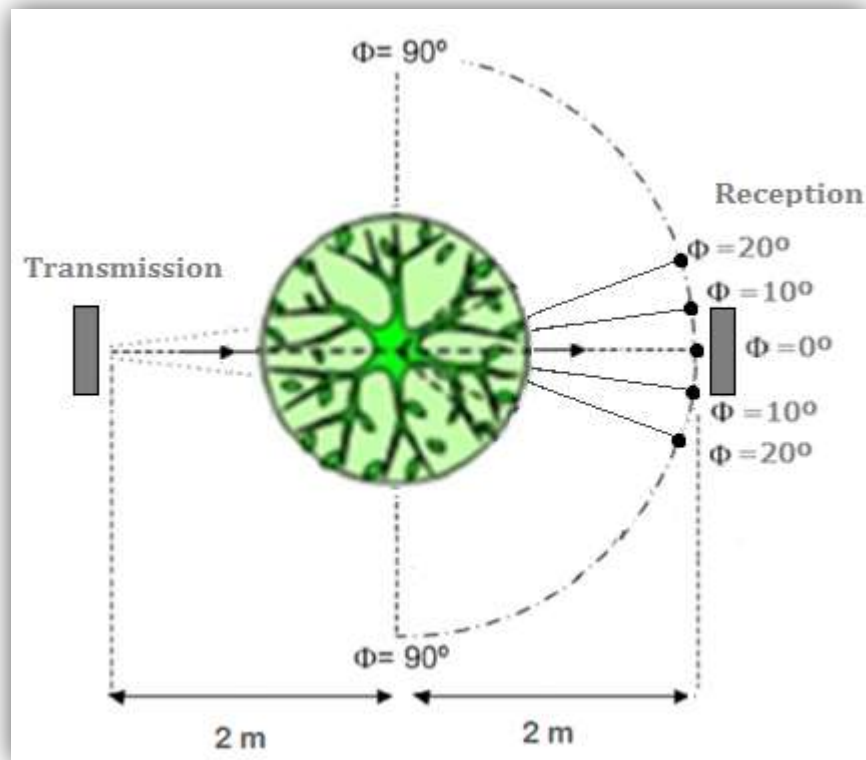


Figura 7.9.8: Modelo de transmisión para diferentes ángulos de recepción

Como se observa se han realizado para las puntos de la copa del árbol C y D, un estudio a cinco ángulos de recepción: 0° , 10° , 20° , -10° , -20° .

En las siguientes graficas indicaremos los datos obtenidos según este modelo, donde indicaremos el nivel de pérdidas en cada ángulo para los puntos C y D, para los dos tipos de polarización que se han utilizado. Cada una de estas tres graficas representará una de las bandas utilizadas en la medición del escenario.

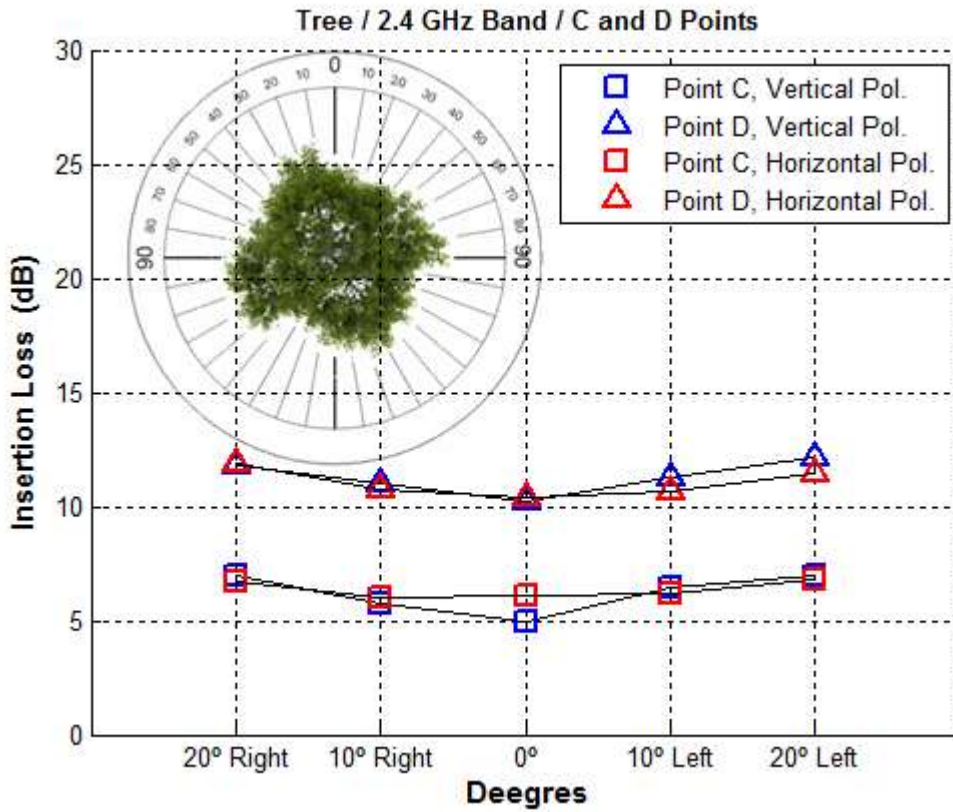


Figura 7.9.9: Medidas para cada ángulo de recepción en la banda 2.4 GHz

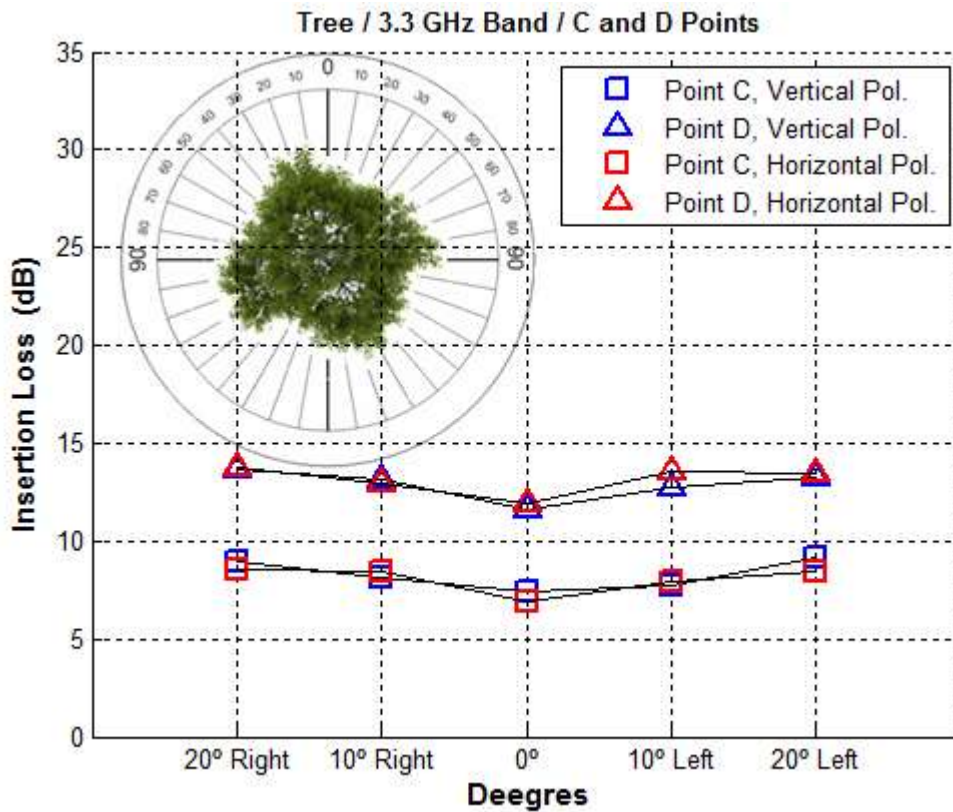


Figura 7.9.10: Medidas para cada ángulo de recepción en la banda 3.3 GHz

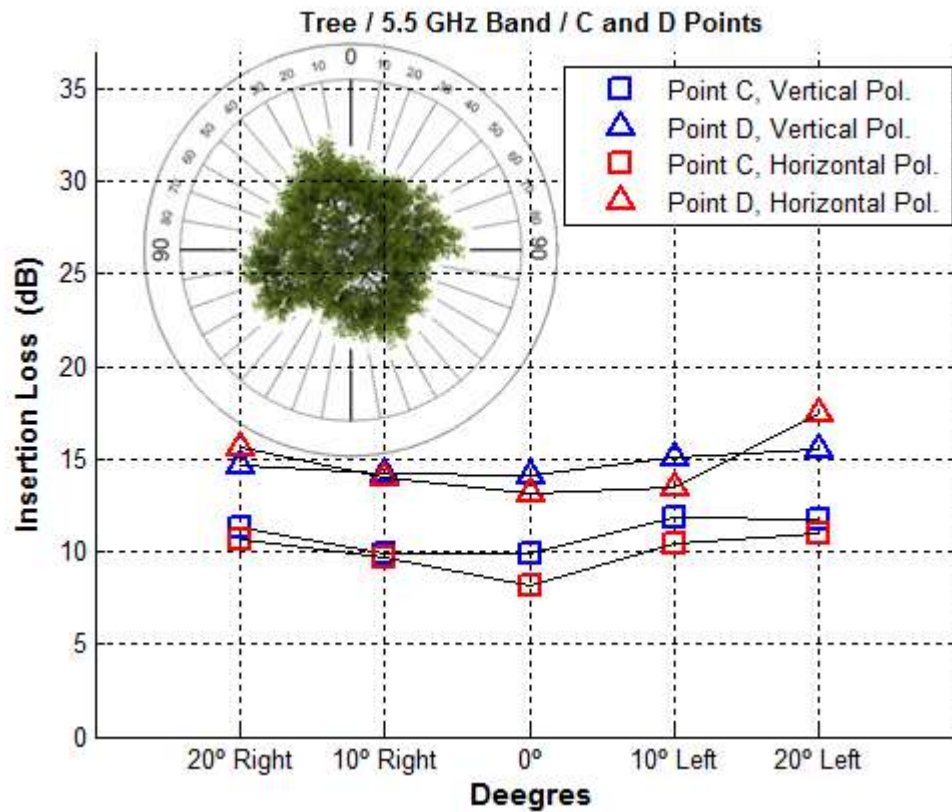


Figura 7.9.11: Medidas para cada ángulo de recepción en la banda 5.5 GHz

- En las siguientes graficas para vamos indicar el nivel de pérdidas que se producen para todos los puntos del estudio, donde de manera visual vamos a destacar las diferencias entre el tronco y la copa del árbol, así como también las perdidas introducidas si se cambia el ángulo en la recepción

Lo que se pretende con estas graficas es analizar el efecto de la dispersión de las hojas, y el efecto que produce el tronco con respecto a estas. También podremos observar los cambios que se producen cuando aumentamos la banda de trabajo en el radioenlace.

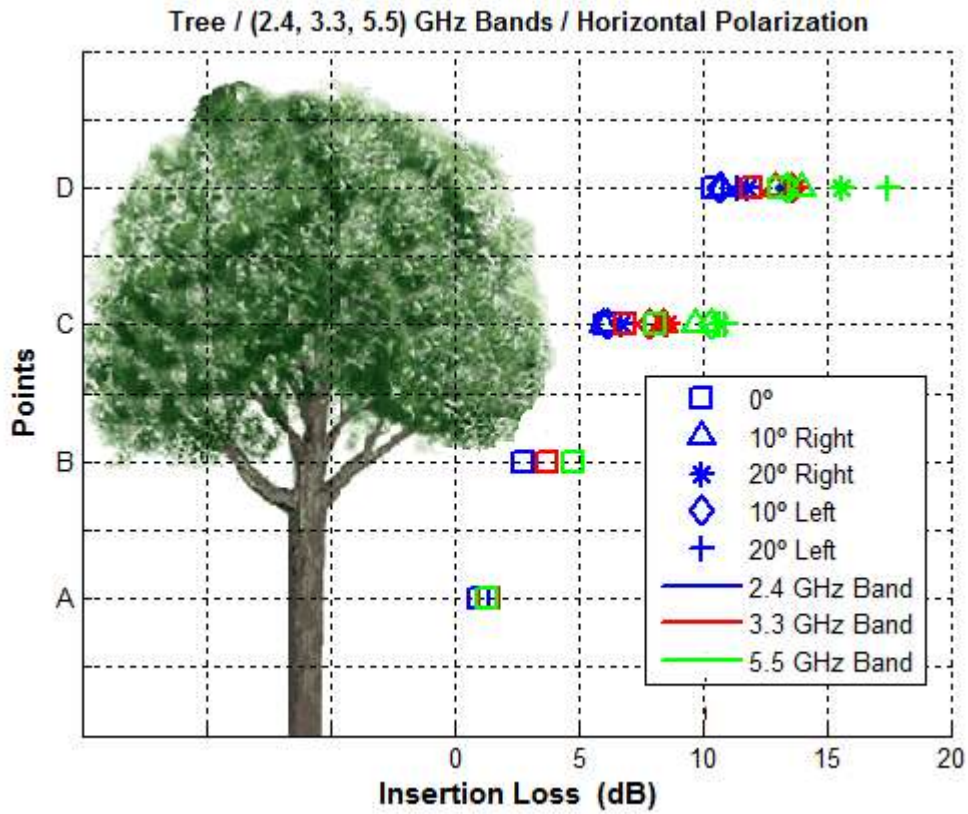


Figura 7.9.12: Medidas en las tres bandas para todos los puntos en Polarización Horizontal

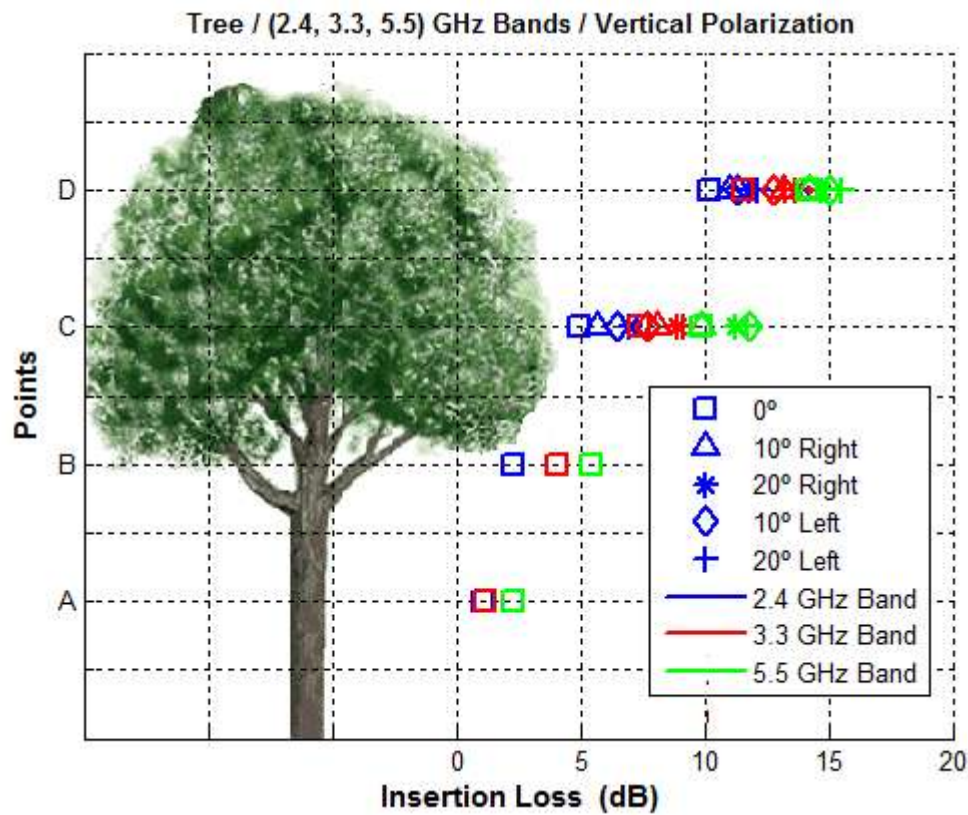


Figura 7.9.13: Medidas en las tres bandas para todos los puntos en Polarización Vertical

7.9.4 Segundo Caso: "Sin Hojas". Estructura, dimensiones y puntos de análisis



Figura 7.9.14 y 7.9.15: Diferentes vistas del árbol sin hojas

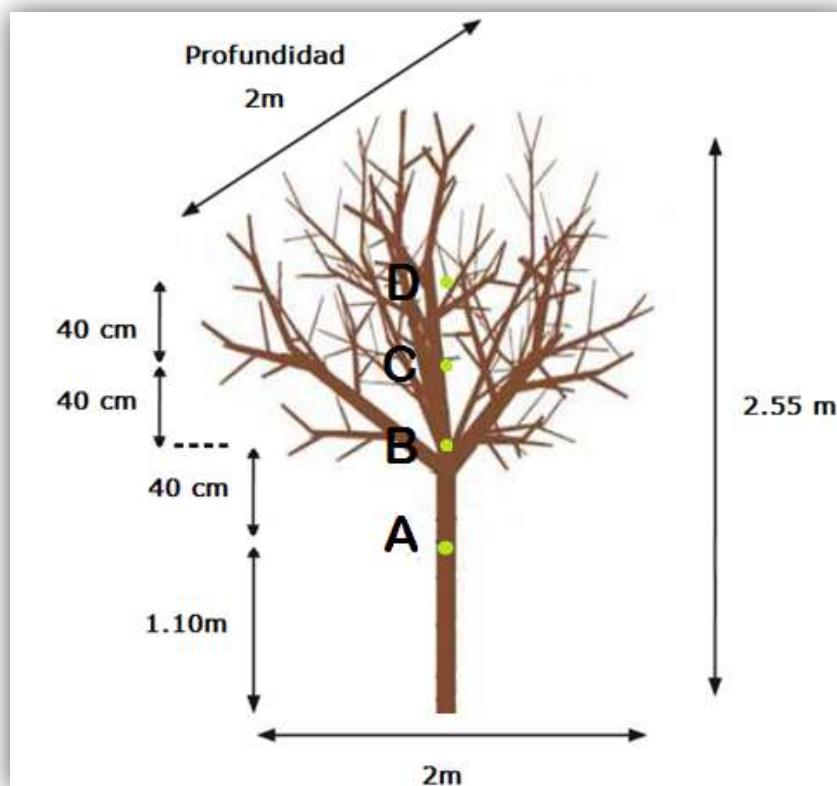


Figura 7.9.16: Dimensiones y puntos de análisis del escenario

7.9.5 Teoría aplicada: Modelización de la estructura

Como podemos observar este escenario es exactamente el mismo que el anterior, es decir, es el mismo árbol pero esta vez sin hojas. De tal manera que solo está constituido por el tronco y todas las ramificaciones que poseía el anterior escenario.

En este caso el modelo anteriormente utilizado para caracterizar las pérdidas de inserción en el árbol, ya no es válido, y se tendrá que asumir otros tipos de factores y fenómenos que afectan a este obstáculo.

Al no estar previsto de abundantes hojas la copa del árbol, las pérdidas de inserción por dispersión ya no se tendrán que asumir, y solo se tendrá en cuenta el efecto de difracción que sufren las diversas ramificaciones de la copa.

Este escenario, por tanto, se puede considerar como un obstáculo de bajas pérdidas de inserción, donde el único material que atraviesa es la propia madera del árbol que constituye las finas ramificaciones y el tronco.

Además el efecto de absorción que podrían tener las hojas ya no existiría, lo cual es un dato destacable para intuir las pérdidas que poseerá este escenario en comparación con el otro.

Otro efecto, como hemos señalado, es la contribución de componentes de la señal difractadas en el tronco y en las ramas, de tal manera que se sumaran muchas de ellas a la señal principal, bajando así las pérdidas de inserción meras del material.

Por último señalar que, con respecto al modelo anterior, si se conservan las pérdidas por reflexión en el suelo, ya que los puntos de interés donde se realizarán las mediciones serán los mismos que los del árbol con hojas.

7.9.6 Resultados y análisis del escenario

- Como se realizó para el caso del árbol con hojas, en este escenario realizaremos los mismos tipos de mediciones, donde los puntos de interés serán a alturas idénticas: A, B, C y D. Se utilizarán las mismas bandas de frecuencia y los mismos ángulos en recepción: 10° , 20° , -10° y -20° , así como también la polarización vertical y la polarización horizontal.

Lo que se pretende con las siguientes gráficas es indicar los mismos datos que en el escenario anterior, con el fin de analizar el árbol sin hojas y compararlo con el mismo pero con hojas en su copa.

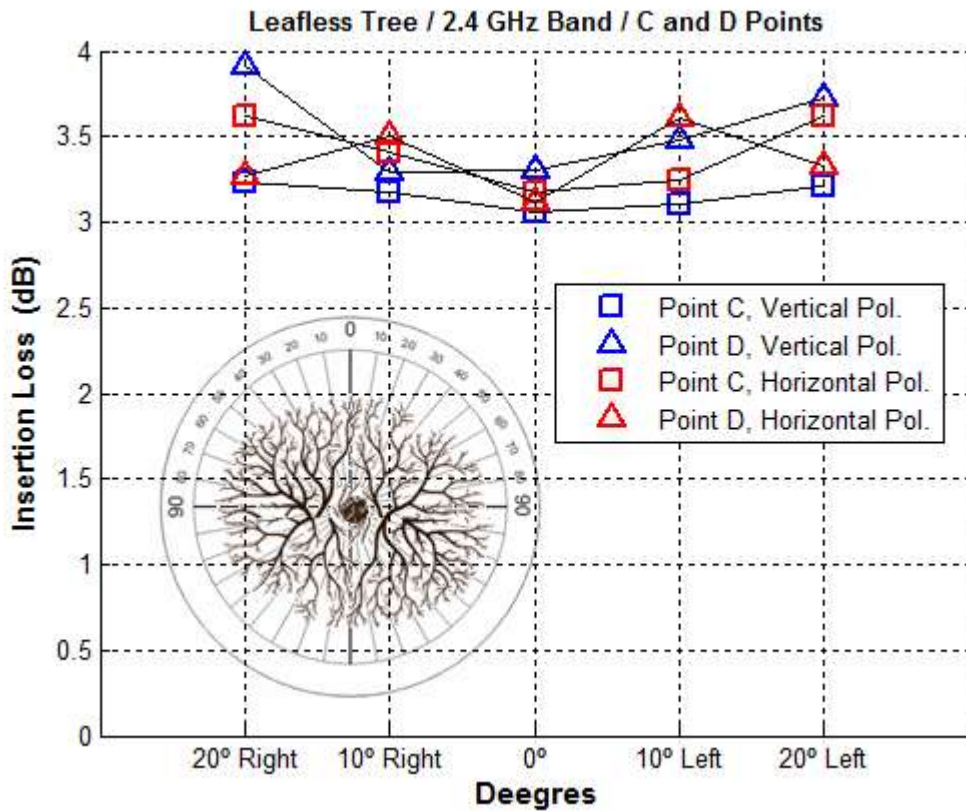


Figura 7.9.17: Medidas para cada ángulo de recepción en la banda 2.4 GHz

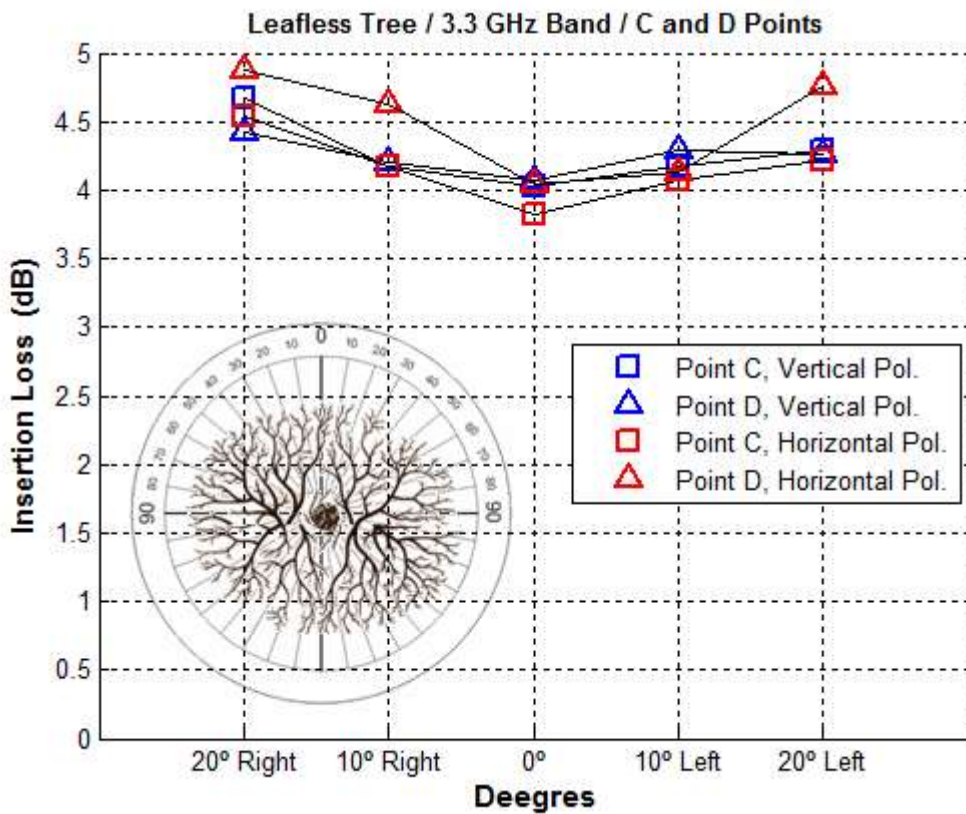


Figura 7.9.18: Medidas para cada ángulo de recepción en la banda 3.3 GHz

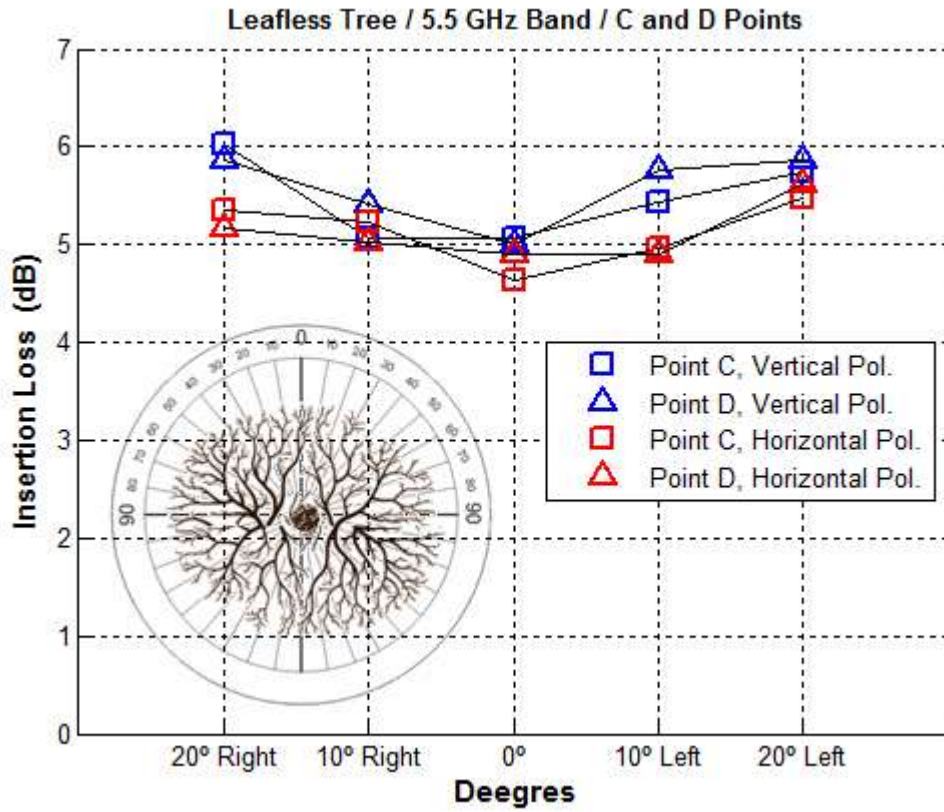


Figura 7.9.19: Medidas para cada ángulo de recepción en la banda 5.5 GHz

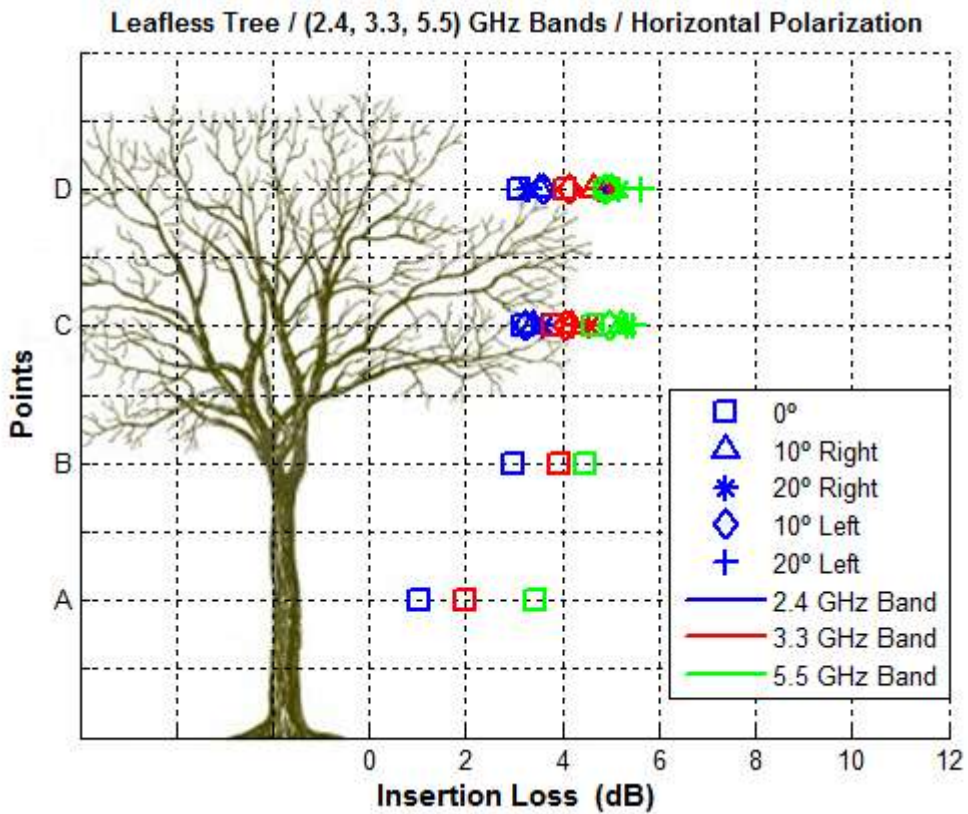


Figura 7.9.20: Medidas en las tres bandas para todos los puntos en Polarización Horizontal

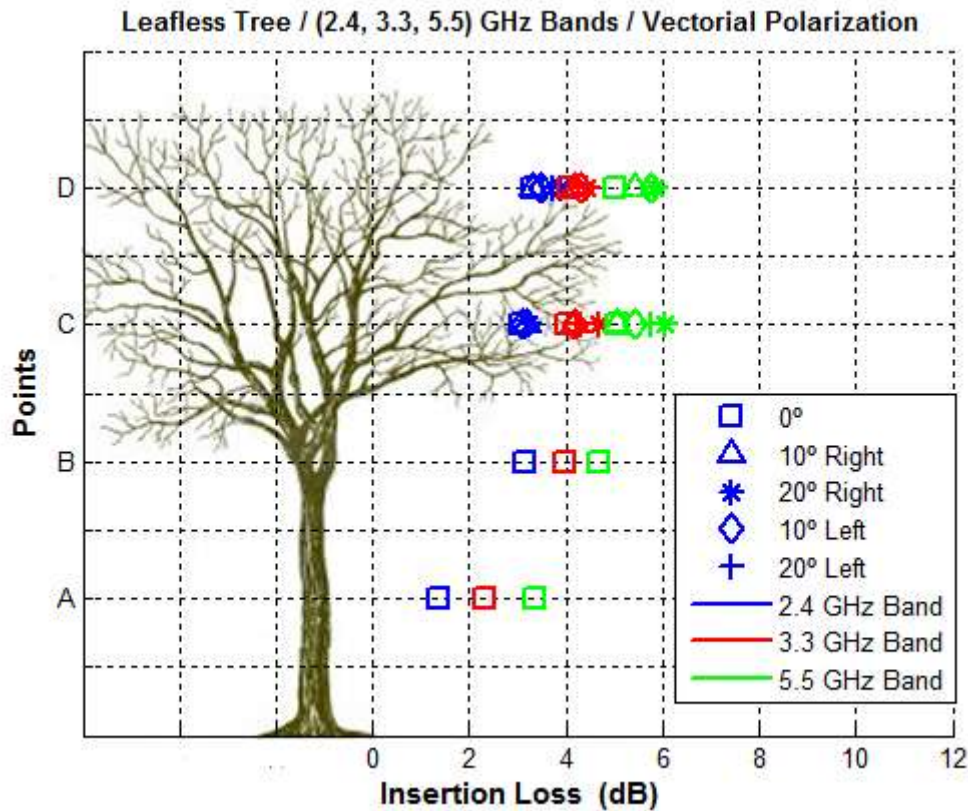


Figura 7.9.21: Medidas en las tres bandas para todos los puntos en Polarización Vertical

7.9.7 Comparativa entre los dos casos: “Con hojas” y “Sin hojas”

Para analizar todos los datos ofrecidos en los dos casos y llegar a una serie de conclusiones definitivas, hemos realizado una comparativa entre el “Caso 1” y el “Caso 2”. Lo que se pretende en este apartado es observar claramente el efecto que tienen las hojas en los árboles, y ver cómo afecta a la señal cuando el árbol está “desnudo”.

Con esto se podrá llegar a una serie de observaciones de interés, donde el tema del “Clima” será un factor destacable a tener en cuenta, es decir, analizar la diferencia de establecer un radioenlace en invierno u otoño o en primavera o verano.

Las siguientes graficas relacionarán los dos casos descritos, y se realizará en las mismas una serie de comparativas, tanto a nivel de ángulos en recepción, como de polarizaciones, así como bandas de trabajo o puntos de interés.

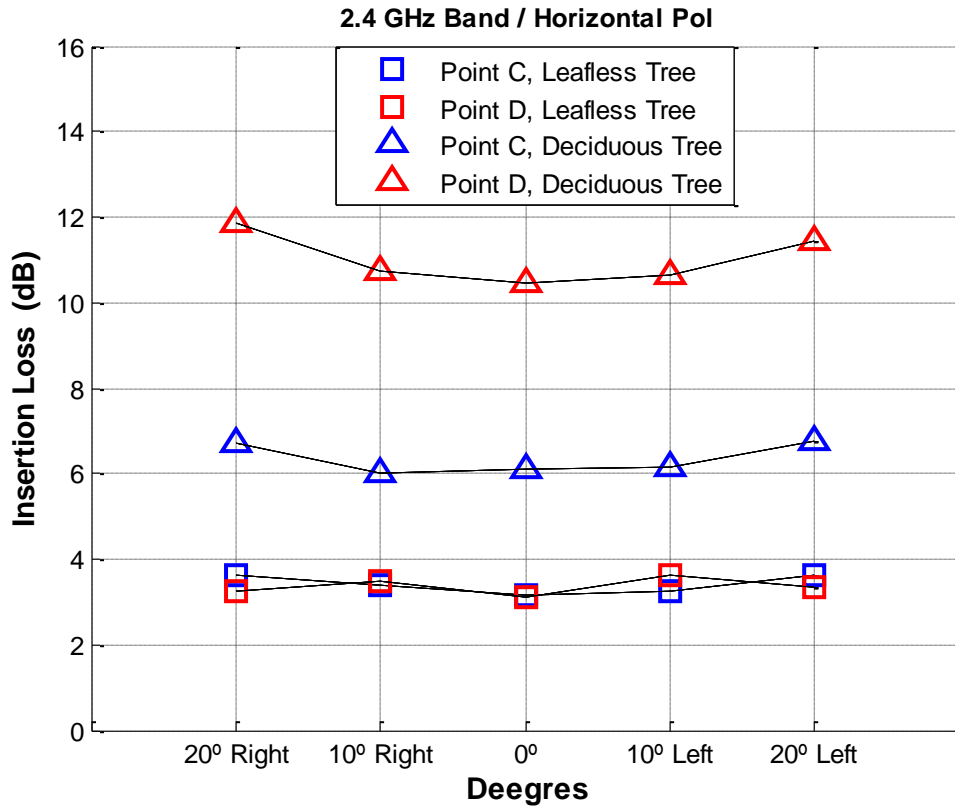


Figura 7.9.22: Comparativa de los puntos C y D para 2.4 GHz, en Polarización Horizontal

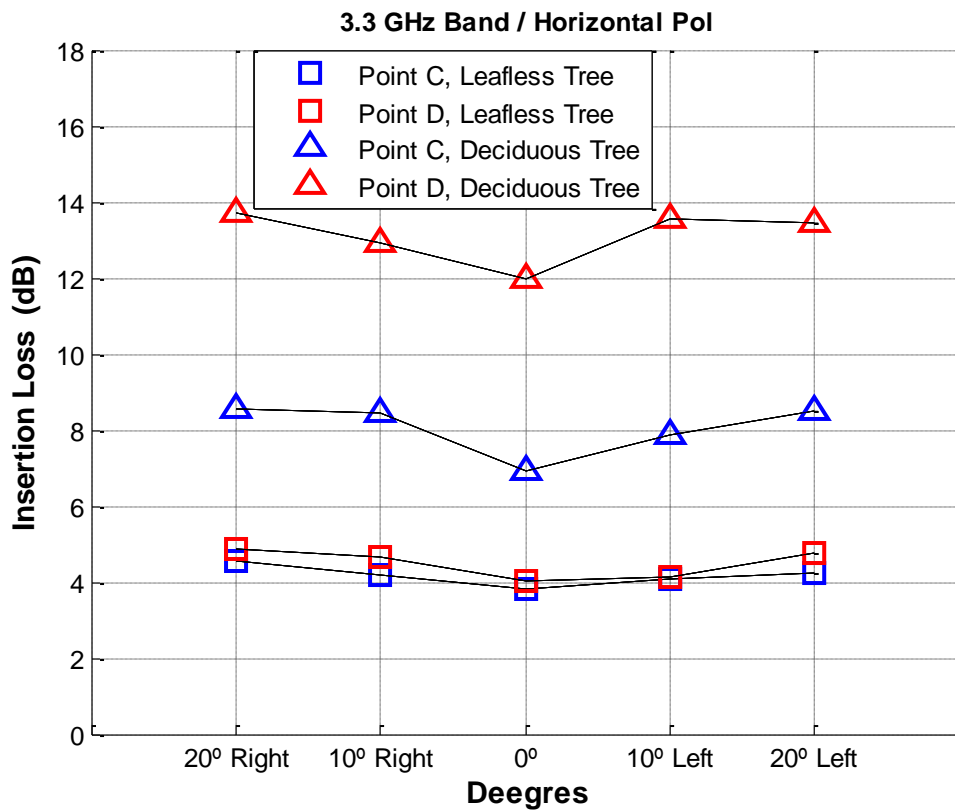


Figura 7.9.23: Comparativa de los puntos C y D para 3.3 GHz, en Polarización Horizontal

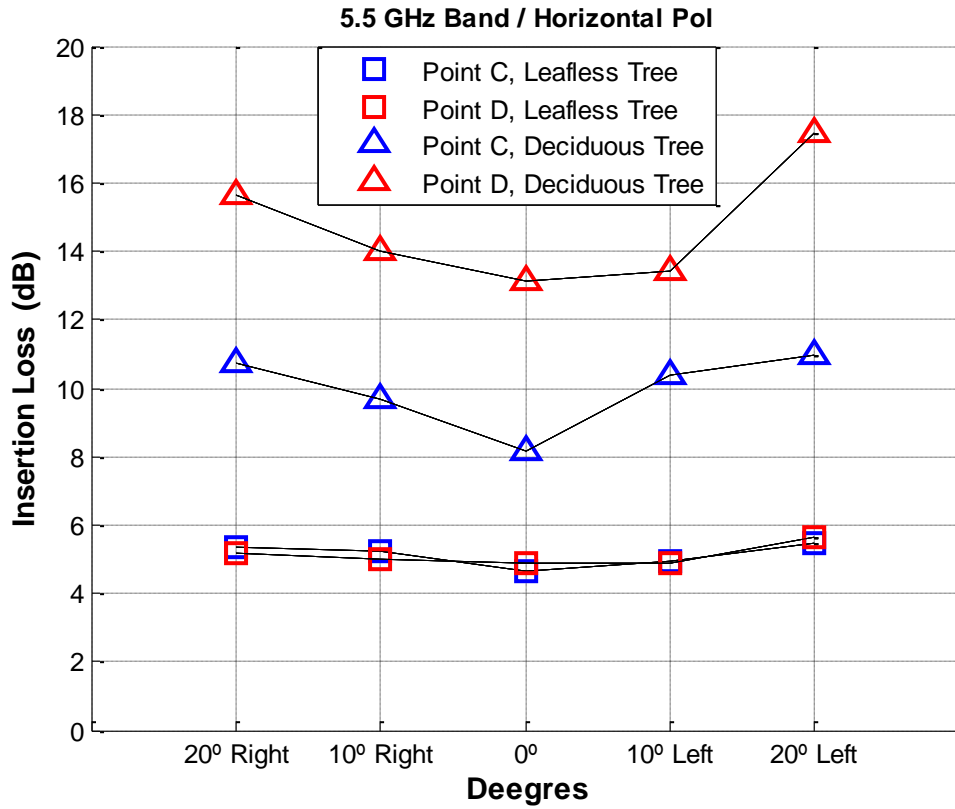


Figura 7.9.24: Comparativa de los puntos C y D para 5.5 GHz, en Polarización Horizontal

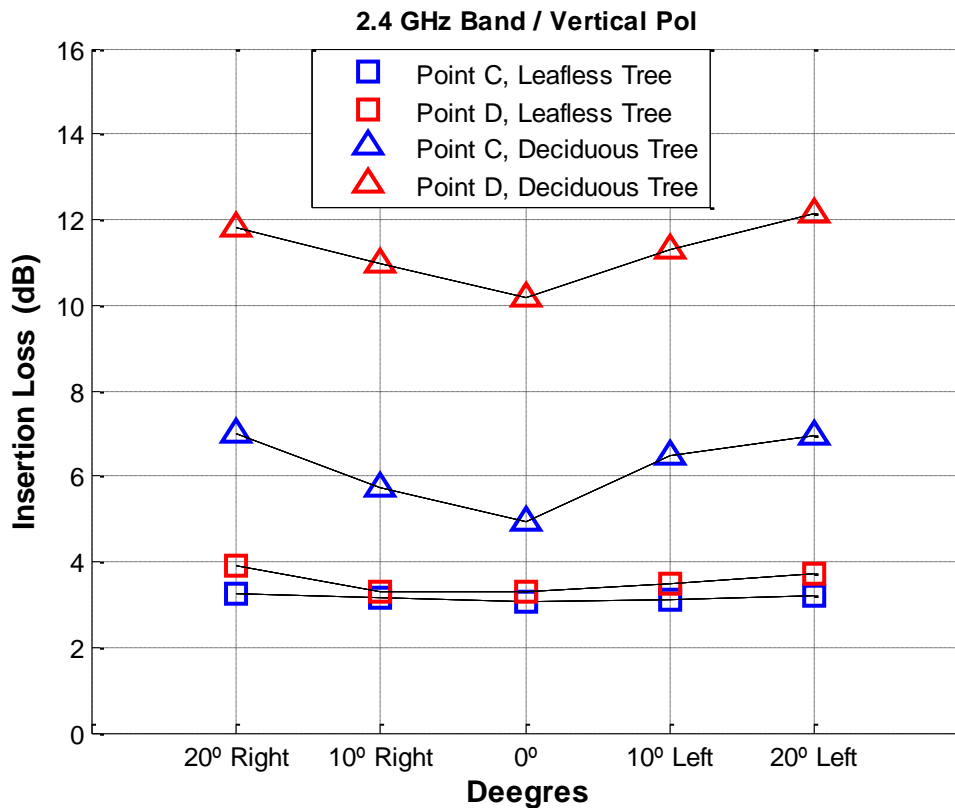


Figura 7.9.25: Comparativa de los puntos C y D para 2.4 GHz, en Polarización Vertical

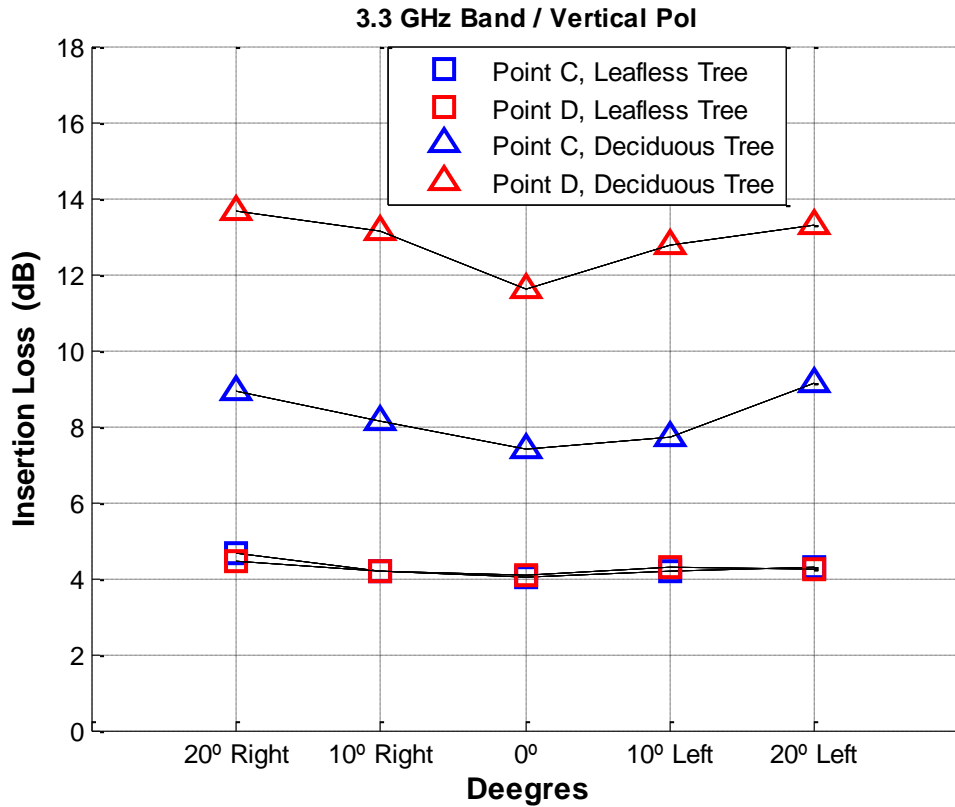


Figura 7.9.26: Comparativa de los puntos C y D para 3.3 GHz, en Polarización Vertical

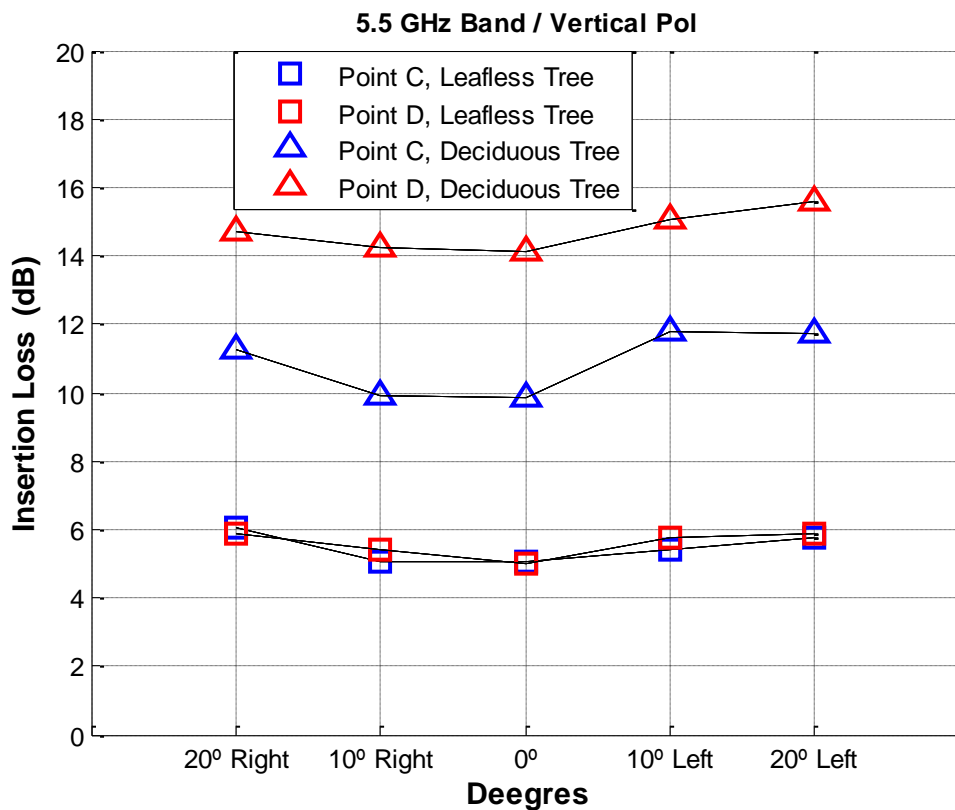


Figura 7.9.27: Comparativa de los puntos C y D para 3.3 GHz, en Polarización Vertical

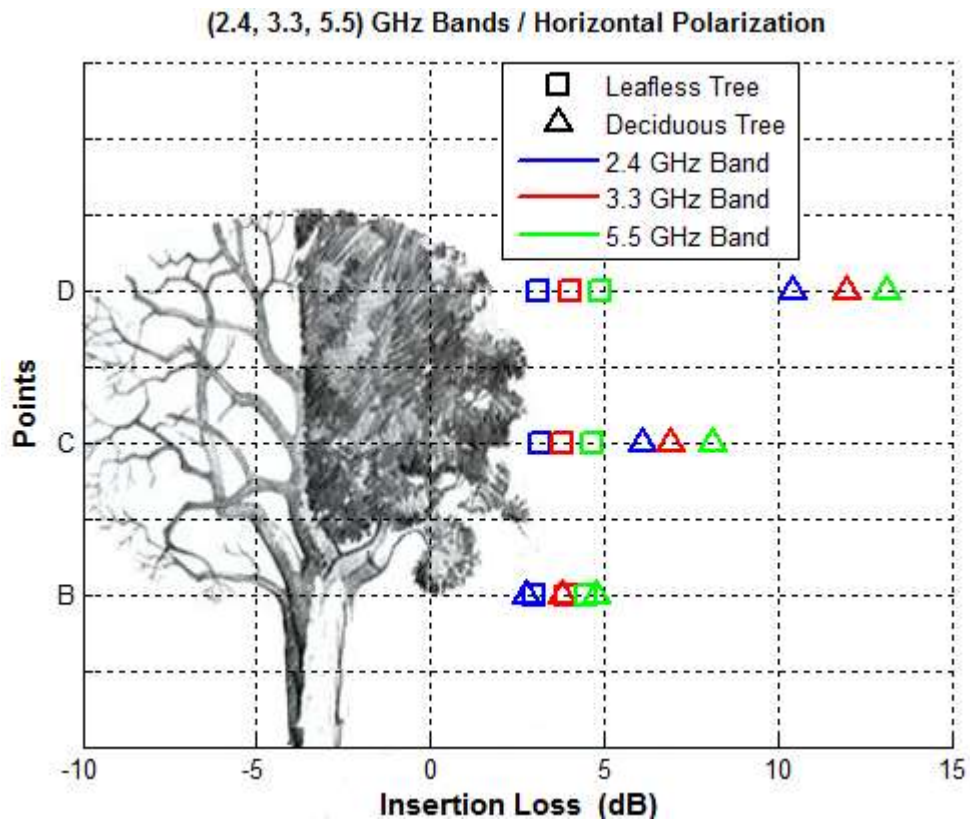


Figura 7.9.28: Comparativa de todos puntos, para las tres bandas, en Polarización Horizontal

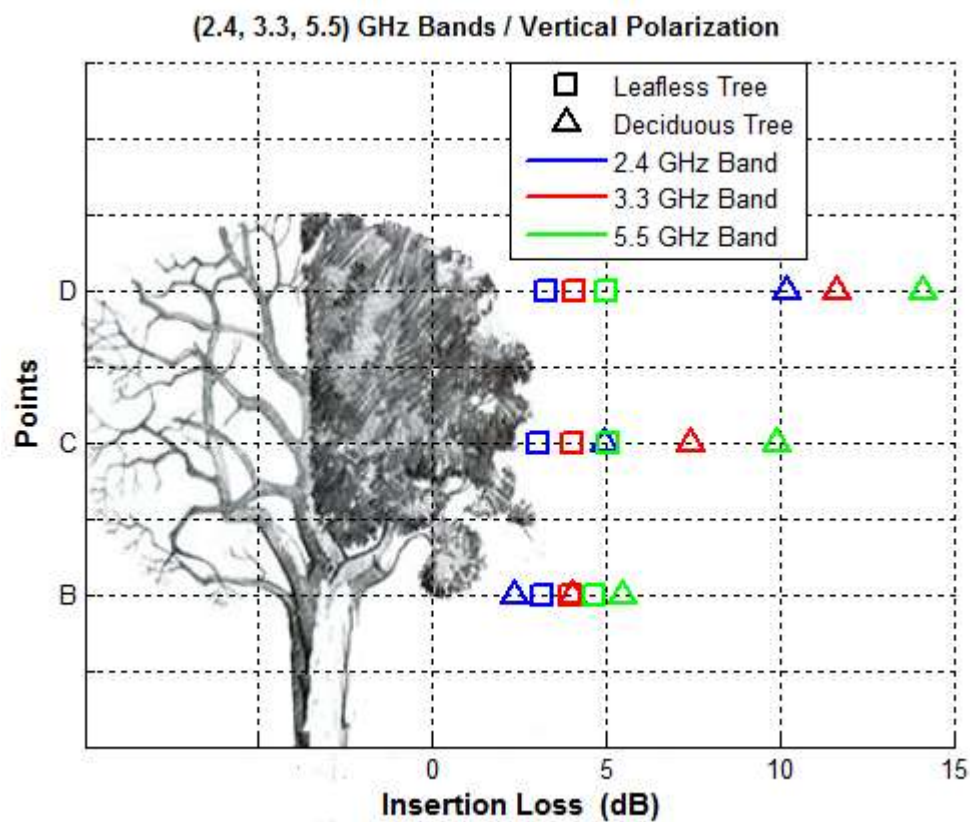


Figura 7.9.29: Comparativa de todos puntos, para las tres bandas, en Polarización Vertical

7.9.8 Conclusiones

Como hemos comentado a lo largo de este escenario, se ha realizado medidas del árbol en diferentes tipos de estaciones, es decir, para el árbol cuando aun poseía las hojas en su copa, y cuando estas desaparecieron dejando al árbol desnudo. El interés de este escenario es analizar el efecto que tiene las hojas en este obstáculo a nivel de pérdidas de inserción. Será de gran interés este estudio debido a que es un obstáculo común en radioenlaces en la vida cotidiana.

Hemos destacado que dependiendo si tiene hojas o no el árbol, los modelos de análisis y los efectos que ocurren son bastante diferentes, y por lo tanto es importante tener en cuenta la estación o climatología en el escenario.

Hemos observado que, cuando el obstáculo no está previsto de abundantes hojas la copa del árbol, las pérdidas inserción por dispersión ya no se asumen, y solo se tendrá en cuenta el efecto de difracción que sufren las diversas ramificaciones de la copa. Sin embargo cuando si las tiene, se debe tener muy en cuenta los efectos de dispersión que producen las mismas y por lo tanto, un aumento claro de las pérdidas de inserción.

Hay que tener también en cuenta en este aumento de pérdidas, el índice de absorción que también tienen estas hojas, ya que cuando no las tiene el único material que atraviesa es la propia madera del árbol que constituye las finas ramificaciones y el tronco.

Con respecto el análisis en diferentes ángulos de recepción, hemos observado que cuando la copa tiene hojas, la diferencia de perdidas con respecto al enlace en 0º es mucho mas considerable, que cuando no tiene hojas. Es claro intuir que este fenómeno ocurre por la dispersión que producen las mismas. Otra conclusión relacionada es que, cuando el árbol no tiene hojas, las perdidas con respecto el final del tronco donde ya empiezan ramificaciones y la copa, son bastante semejantes. Indicamos los datos con los que se verifican estas conclusiones:

– Los resultados obtenidos para el árbol con hojas en 0º son los siguientes:

- Para bandas de frecuencias situadas en 2.4 GHz las pérdidas de inserción producidas en el tronco ronda los 2.5 – 3 dB, mientras que para la copa en el punto “C” ronda los 5 – 6 dB, y en el punto “D” ronda los 10 – 11 dB.
- Para bandas de frecuencias situadas en 3.3 GHz las pérdidas de inserción producidas en el tronco ronda los 4 dB, mientras que para la copa en el punto “C” ronda los 6.5 – 7.5 dB, y en el punto “D” ronda los 12 dB.
- Para bandas de frecuencias situadas en 5.5 GHz las pérdidas de inserción producidas en el tronco ronda los 4.5 – 5 dB, mientras que para la copa en el punto “C” ronda los 8 – 10 dB, y en el punto “D” ronda los 13 – 14 dB.

– Los resultados obtenidos para el árbol sin hojas en 0º son los siguientes:

- Para bandas de frecuencias situadas en 2.4 GHz las pérdidas de inserción producidas en el tronco ronda los 2.5 – 3 dB, mientras que para la copa en el punto “C” ronda los 2.5 – 3 dB, y en el punto “D” ronda los 2.5 – 3 dB.
- Para bandas de frecuencias situadas en 3.3 GHz las pérdidas de inserción producidas en el tronco ronda los 4 dB, mientras que para la copa en el punto “C” ronda los 4 dB, y en el punto “D” ronda los 4 dB.
- Para bandas de frecuencias situadas en 5.5 GHz las pérdidas de inserción producidas en el tronco ronda los 4.5 – 5 dB, mientras que para la copa en el punto “C” ronda los 4.5 – 5 dB, y en el punto “D” ronda los 4.5 – 5 dB.

7.10 Escenario 10: Palmera

Este escenario que vamos a caracterizar es una palmera cuyo nombre específico de especie es Palmito Elevado "Trachycarpus Fortunei". Este escenario está situado en una urbanización del barrio de Montecarmelo en Madrid.

7.10.1 Estructura, dimensiones y puntos de análisis



Figura 7.10.1 y 7.10.2: Diferentes vistas de la palmera

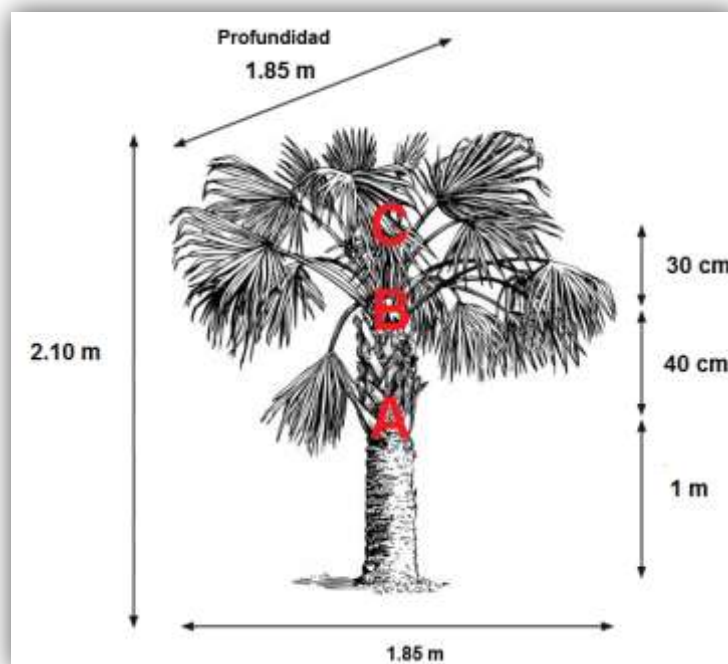


Figura 7.10.3: Dimensiones y puntos de análisis del escenario

7.10.2 Teoría aplicada: Modelización de la estructura

Cada elemento constitutivo de una planta se considera como un dispersor de la radiación electromagnética incidente. Para los árboles o plantas, las hojas son un claro ejemplo de dispersión donde dependiendo del tipo, composición y forma las hojas pueden modelarse geoméricamente como un modelo matemático geométrico de dispersión. Por ejemplo para las hojas coníferas se suelen modelar como dispersores en forma de agujas, y a las hojas caducas, como dispersores en forma de discos circulares. El conjunto de la planta o árbol puede modelarse como una composición de dispersores de cada especie, formando conos de agujas o ramificaciones de discos circulares.

Para este escenario al que queremos analizar, las hojas de la palmera son un claro ejemplo de la modelización de dispersión en forma de discos elípticos o circulares. A diferencia de los árboles con hojas caducas que se modelizan como pequeños dispersores, como hemos comentado, la palmera tiene discos de mayor dimensión, y su efecto es mucho más significativo.

En un árbol se considera la agrupación de hojas y ramas como un solo elemento geométrico, y por lo tanto como otro tipo de modelización, sin embargo en la palmera el elemento dispersivo es su hoja y se debe tratar como varios elementos independientes debido a la separación entre ellos y la dimensión de los mismos.

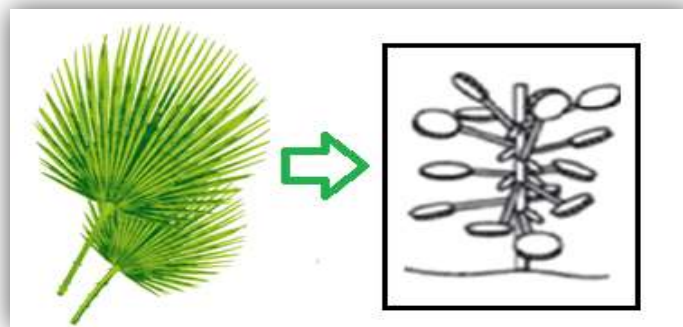


Figura 7.10.4: Modelo de dispersión para la hoja de la palmera

En muchos artículos y en la literatura, se ha estudiado muchos modelos matemáticos para las hojas como dispersores en forma de discos circulares, donde en toda la hoja se señalan los diversos vectores de incidencia y refracción. Toda esta modelización está arraigada a expresiones y formulas matemáticas para caracterizar el comportamiento al incidir señal electromagnética en la propia hoja. Observar cuanta señal se dispersa, refleja o absorbe, es objeto de estudio para una caracterización exhaustiva de las pérdidas que se pueden producir en la transmisión de ondas. [27]

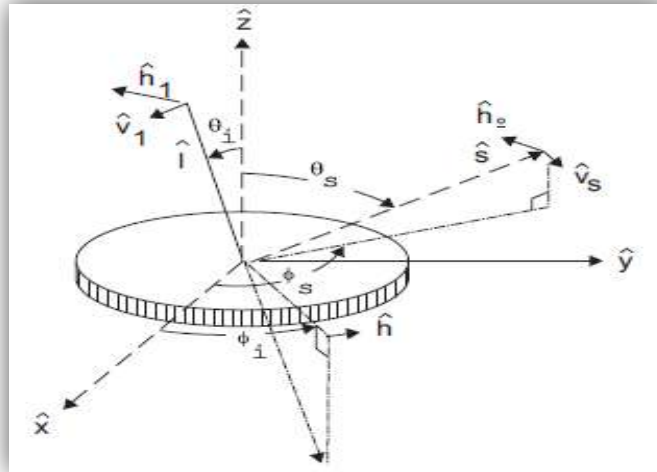


Figura 7.10.5: Esquema general de los vectores de incidencia y refracción del modelo

Como se ha comentado, es claro asumir que, el tipo de pérdidas producidas al atravesar la palmera, serán diferentes para cada punto de interés, es decir la dispersión es aleatoria, mientras que en el árbol, la difracción se podía modelar como un solo bloque, tal y como hemos explicado en el anterior escenario. En la siguiente figura podemos hacernos una idea de la comparativa.

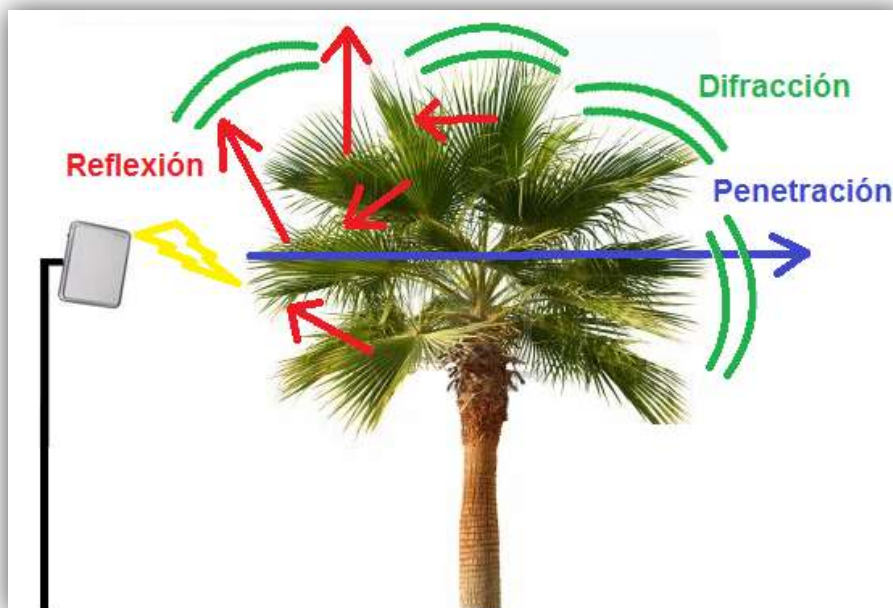


Figura 7.10.6: Modelo de propagación en una palmera

7.10.3 Resultados y análisis del escenario

- A continuación vamos a exponer varias graficas con las pérdidas de inserción obtenidas, para los puntos de interés: A, B y C. Donde “A” pertenece al tronco de la palmera, “B” a la zona frontera entre tronco y la copa; y “C” al centro de la copa de la palmera.

Estas graficas se realizaron para la orientación de 0° entre antenas, es decir, un enlace estándar, para las tres bandas de frecuencia que tienen nuestras antenas, y para los dos tipos de polarizaciones, vertical y horizontal.

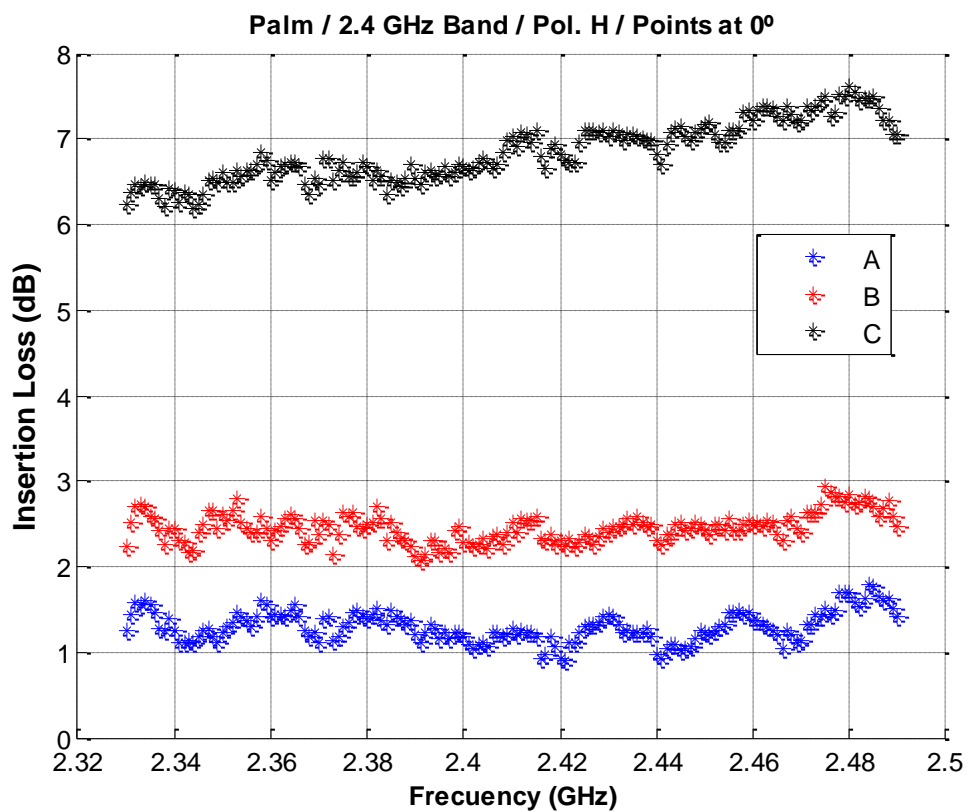


Figura 7.10.7: Medida en 2.4 GHz en los tres puntos en 0° para la Polarización Horizontal

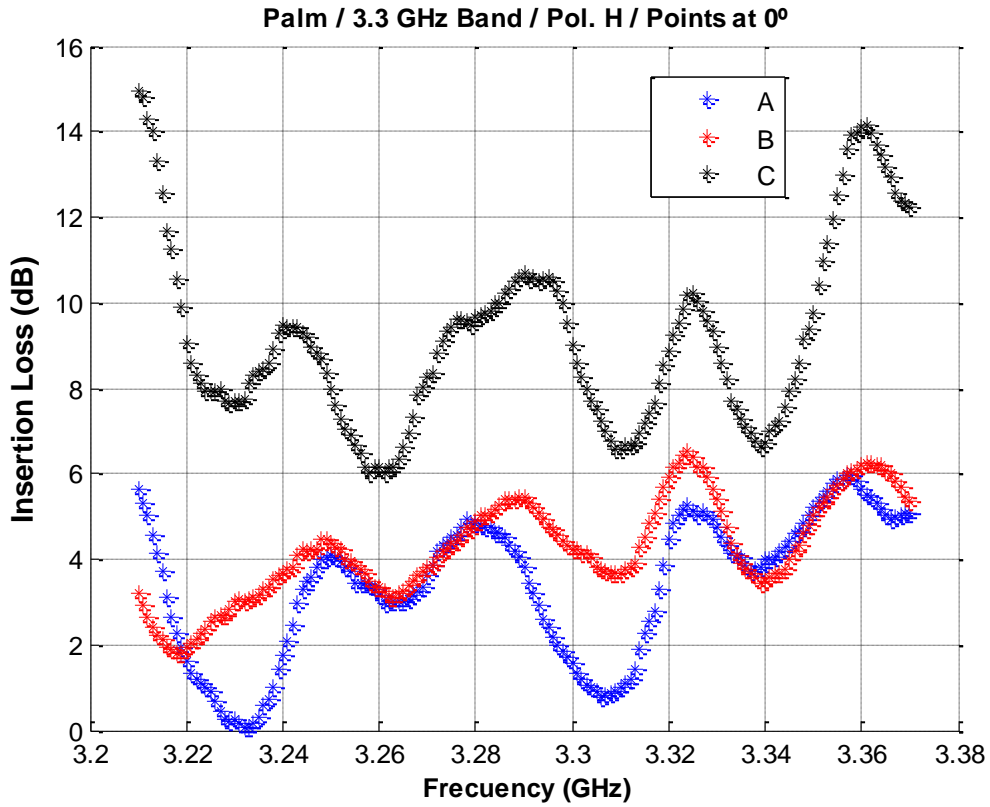


Figura 7.10.8: Medida en 3.3 GHz en los tres puntos en 0° para la Polarización Horizontal

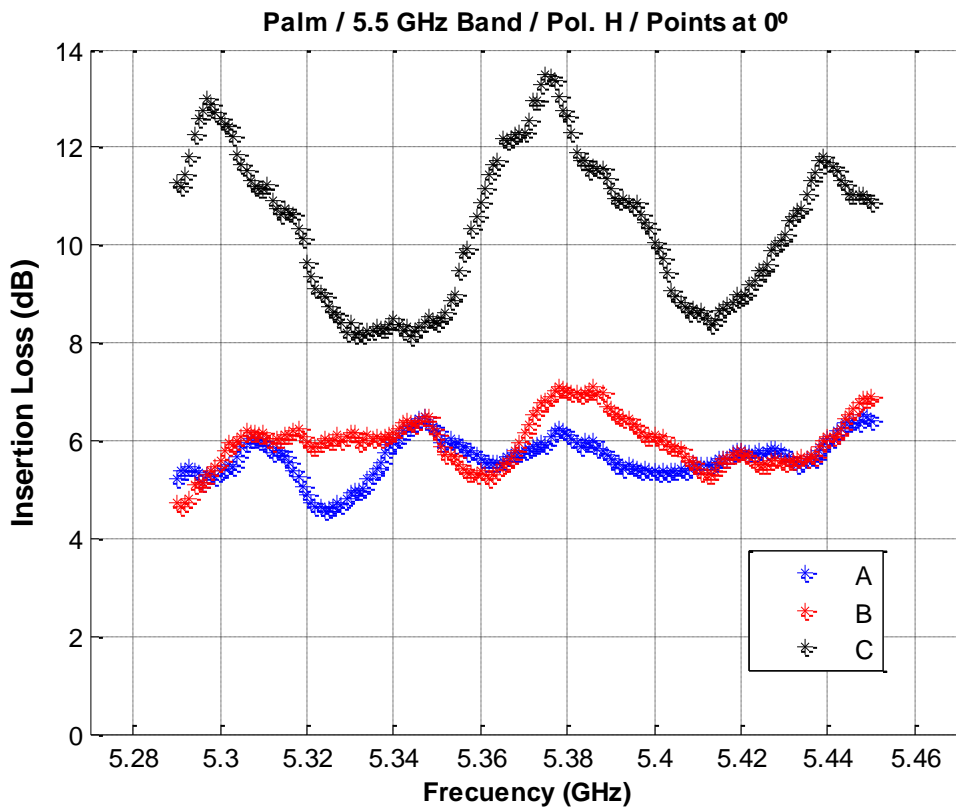


Figura 7.10.9: Medida en 3.3 GHz en los tres puntos en 0° para la Polarización Horizontal

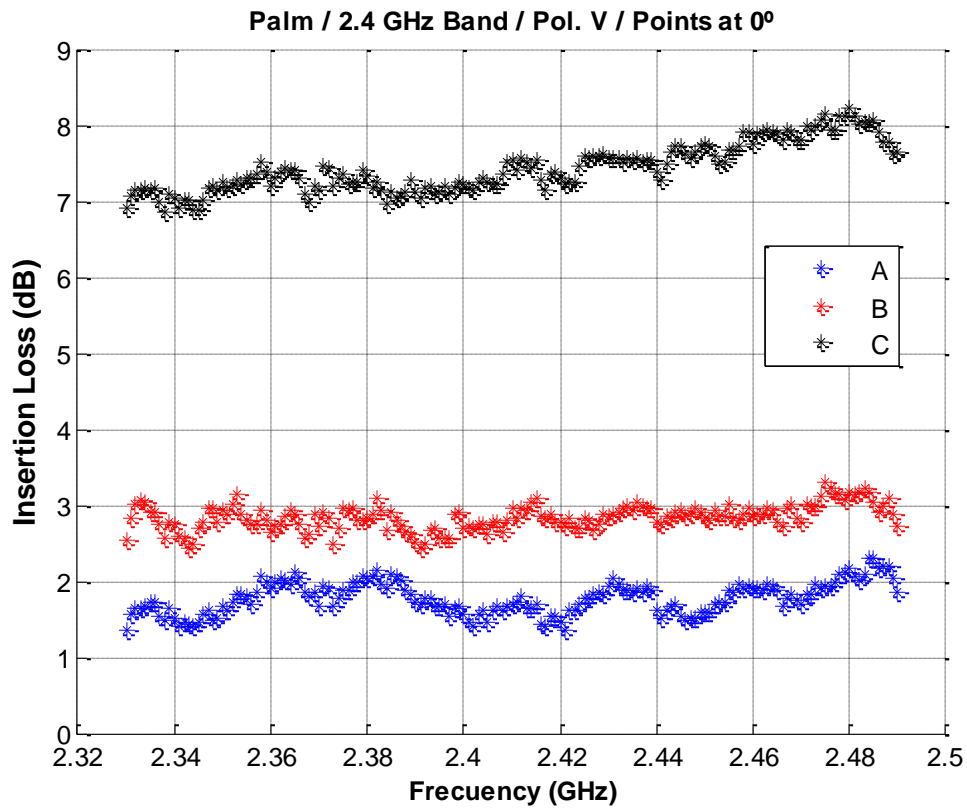


Figura 7.10.10: Medida en 2.4 GHz en los tres puntos en 0° para la Polarización Vertical

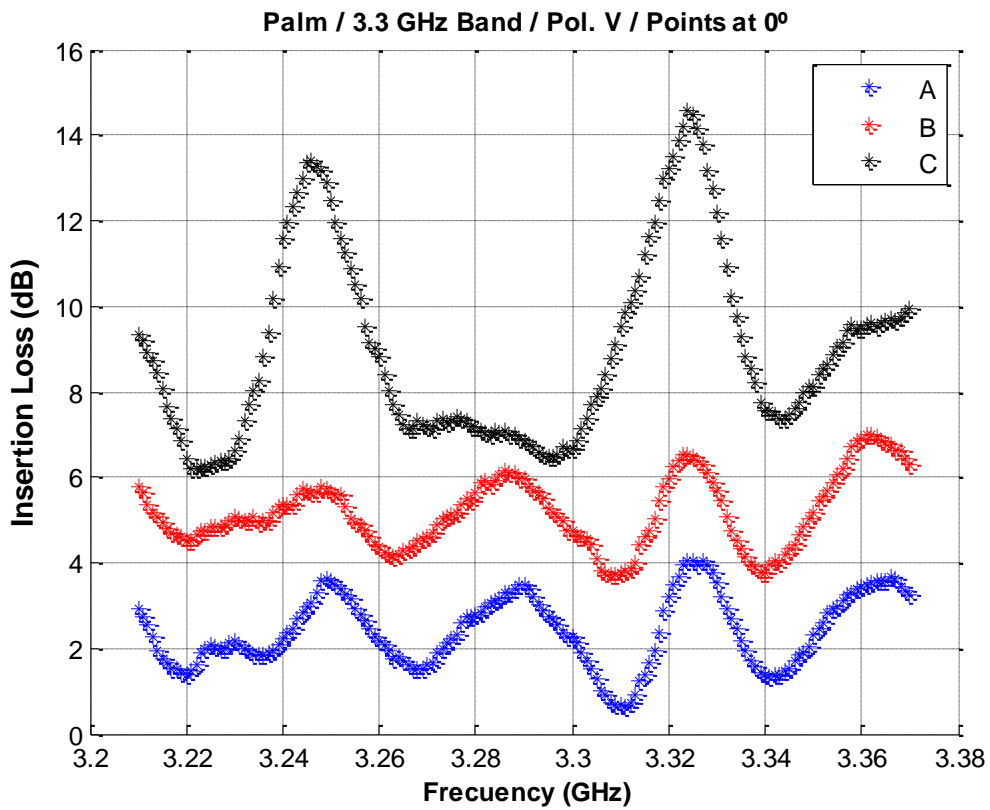


Figura 7.10.11: Medida en 3.3 GHz en los tres puntos en 0° para la Polarización Vertical

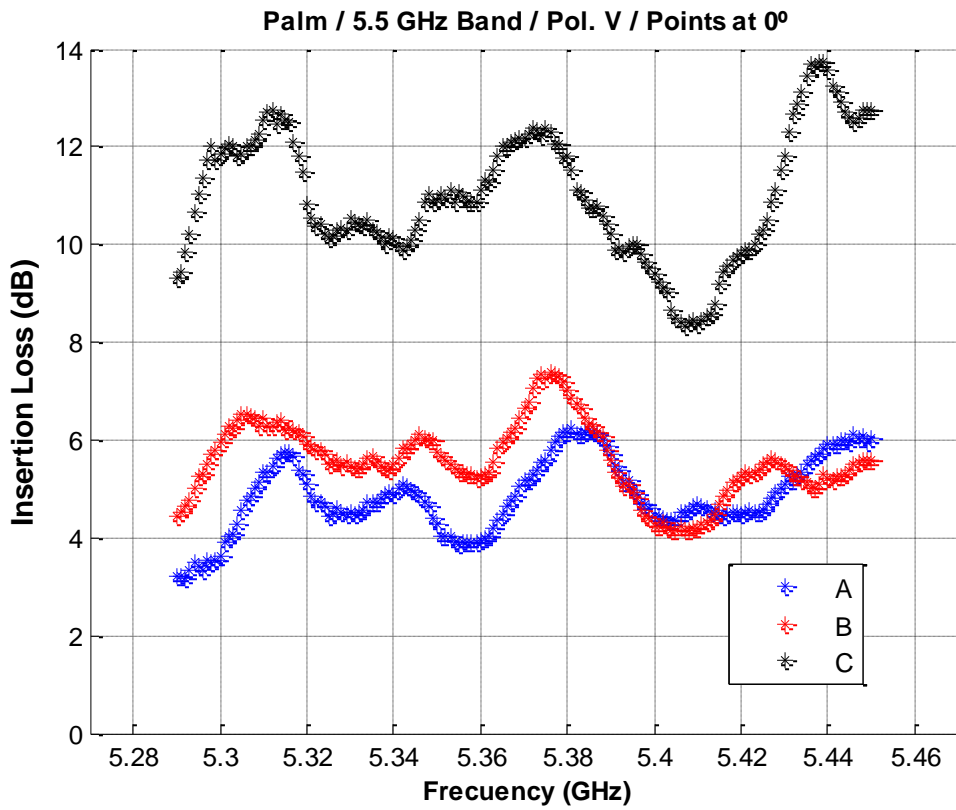


Figura 7.10.12: Medida en 3.3 GHz en los tres puntos en 0° para la Polarización Vertical

- A continuación vamos a realizar las medidas en los diferentes ángulos, como se realizó en el escenario anterior del árbol, para caracterizar de mejor manera la dispersión:

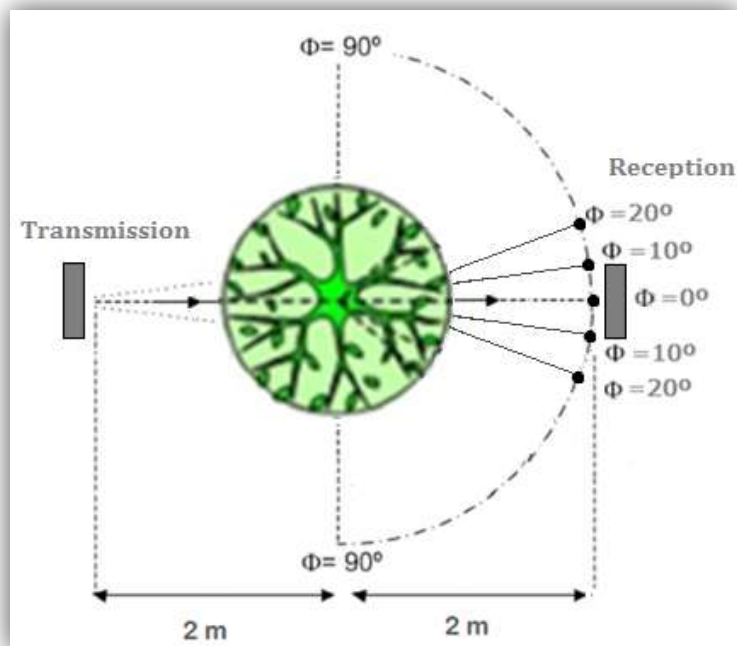


Figura 7.10.13: Modelo de transmisión para diferentes ángulos de recepción

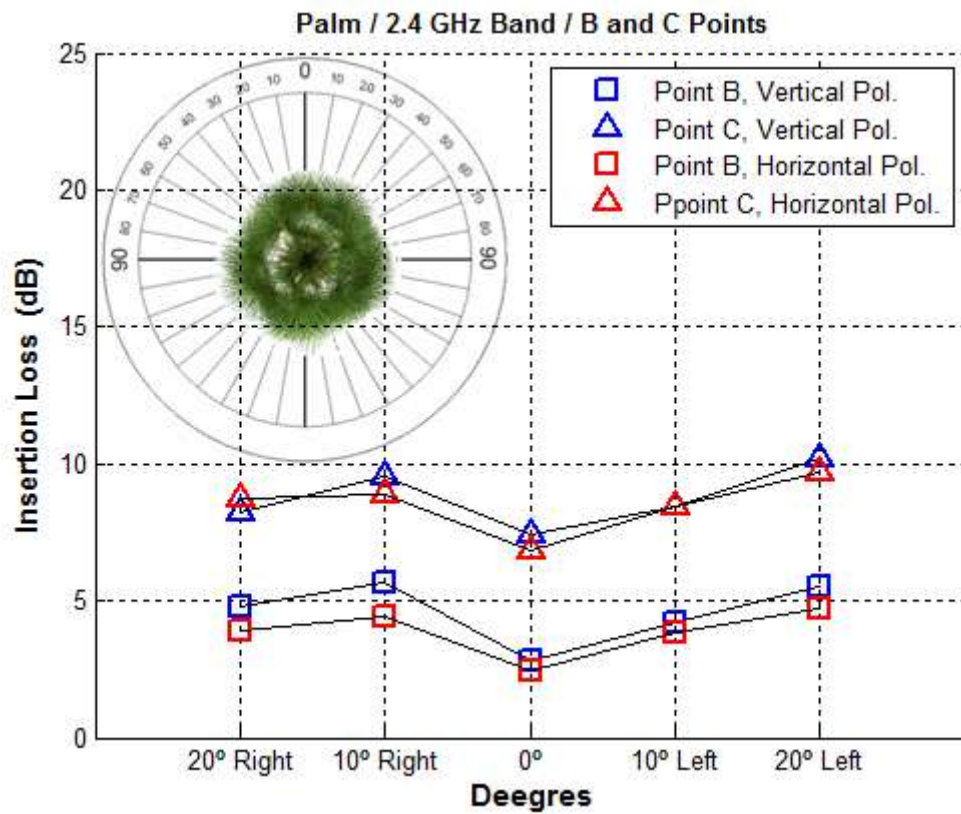


Figura 7.10.14: Medidas para cada ángulo de recepción en la banda 2.4 GHz

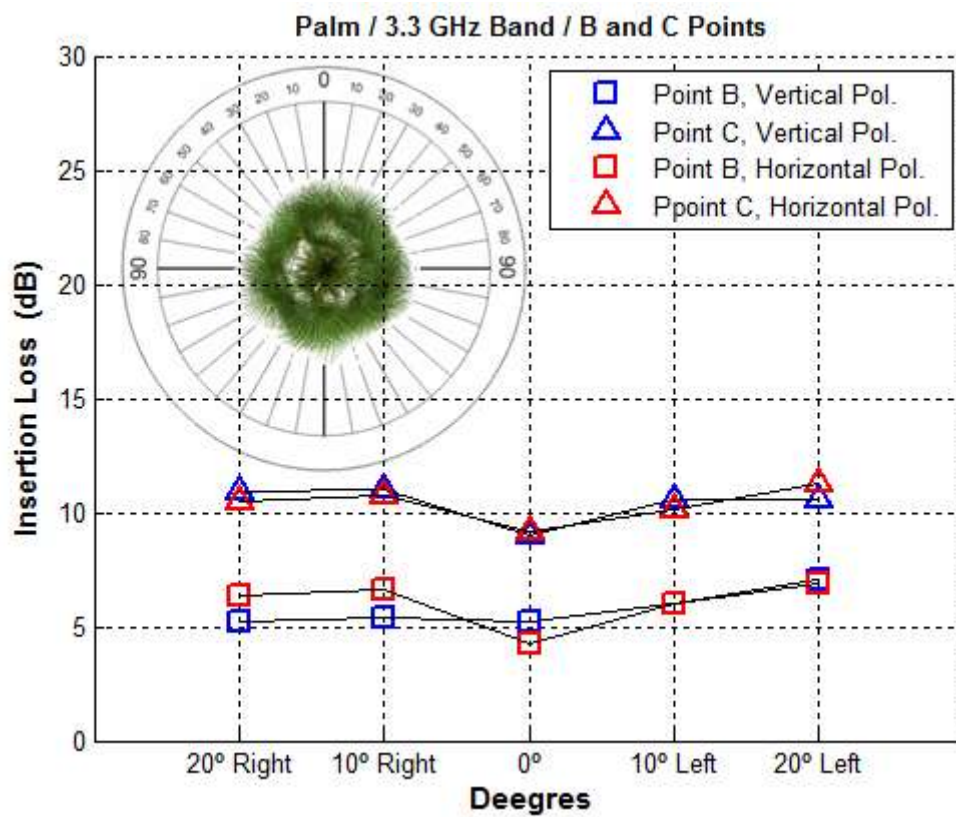


Figura 7.10.15: Medidas para cada ángulo de recepción en la banda 3.3 GHz

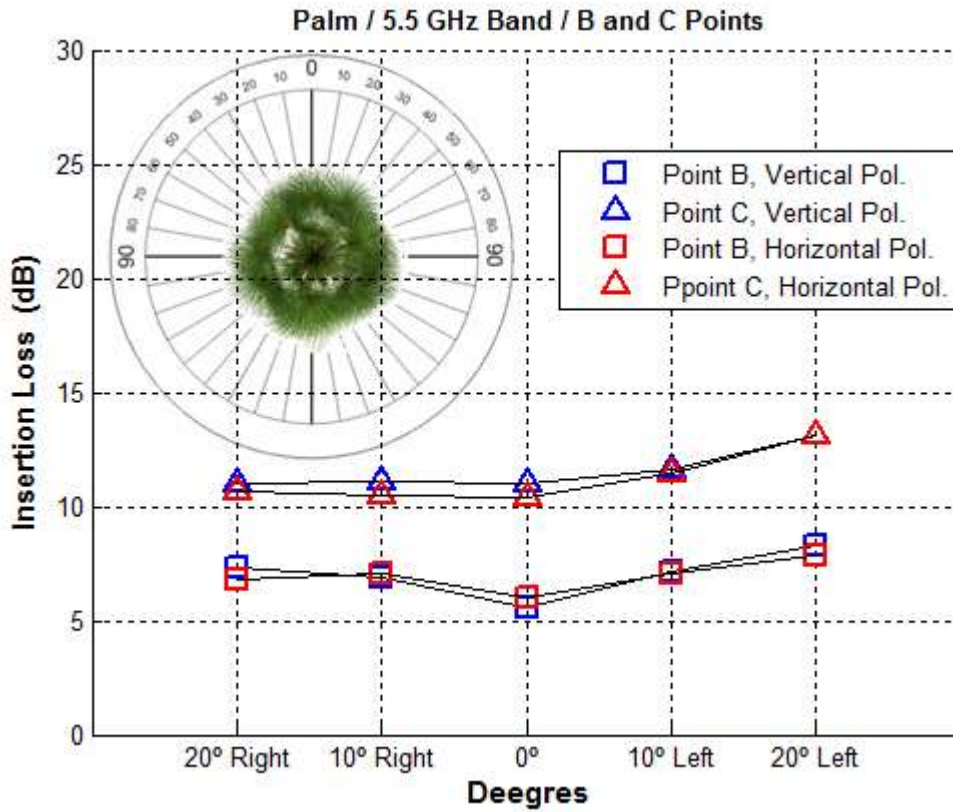


Figura 7.10.16: Medidas para cada ángulo de recepción en la banda 5.5 GHz

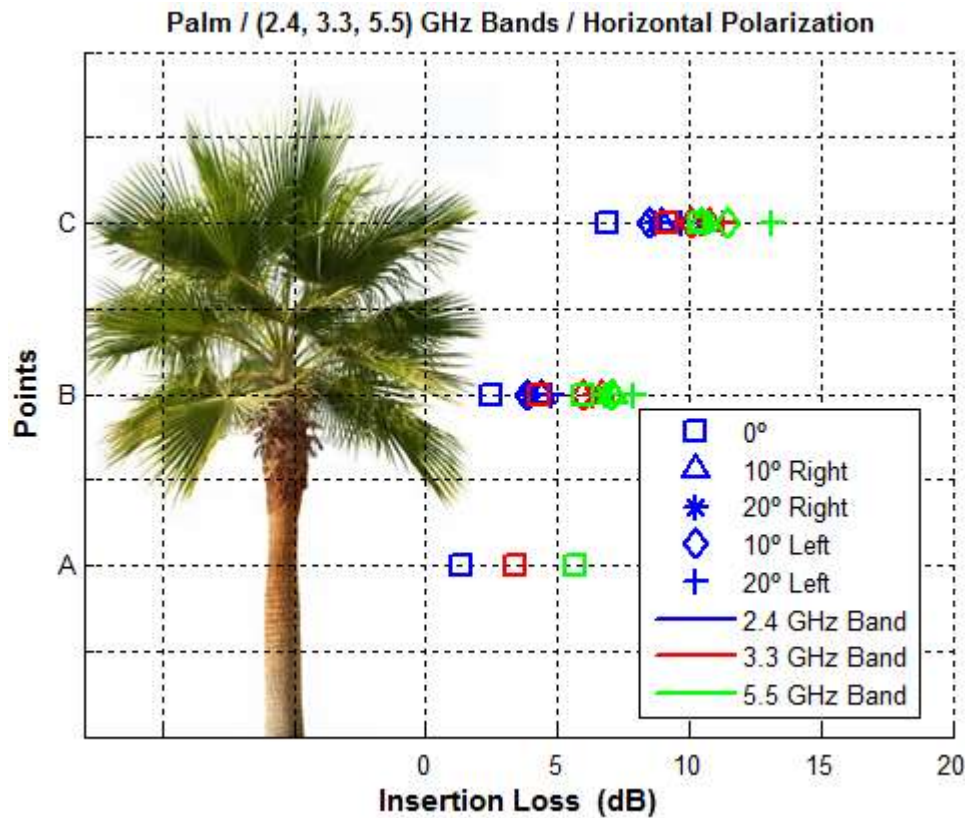


Figura 7.10.17: Medidas en las tres bandas para todos los puntos en Polarización Horizontal

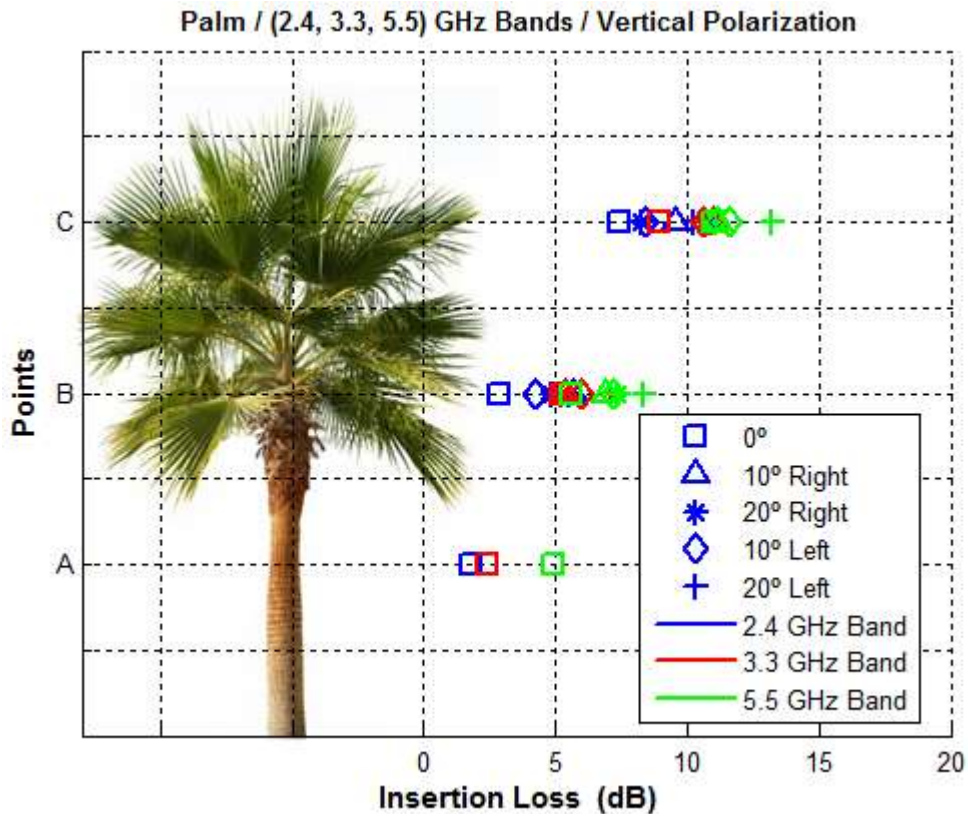


Figura 7.10.18: Medidas en las tres bandas para todos los puntos en Polarización Vertical

7.10.4 Conclusiones

Este escenario que hemos analizado tiene como finalidad sacar conclusiones de cómo afecta el tipo de hoja en la dispersión de las señales, y por lo tanto, como se traduce en pérdidas de inserción. Las hojas de la palmera tienen modelización de dispersión diferente a las hojas pequeñas caducas del escenario anterior. Estas hemos visto que se modelizan como discos elípticos o circulares, y estos al ser planas y de mayor dimensión, el efecto, en términos de dispersión, es mucho más significativo.

Hemos observado que al tener menor cantidad de hojas y sus distribuciones no son homogéneas, las pérdidas de inserción para los diferentes ángulos en recepción serán aleatorias. Observando el anterior escenario del árbol, concluíamos que para cada ángulo de -10° , -20° , 10° y 20° , las graficas que representaban las pérdidas en cada ángulo, eran graficas casi simétricas con respecto a 0° . Sin embargo, como hemos señalado, las pérdidas en cada ángulo para la palmera no cumplen simetría en las graficas respecto a 0° , ya que la distribución de las hojas no es homogénea.

Por otro lado destacar que las pérdidas de inserción que ofrece la palmera son similares a la del escenario anterior, unas debido a la abundancia de pequeñas hojas, y otras a la dimensión y disposición de sus hojas, como es el caso de la palmera.

– Los resultados obtenidos para palmera en 0º son los siguientes:

- Para bandas de frecuencias situadas en 2.4 GHz las pérdidas de inserción producidas en el tronco ronda los 1.5 – 2 dB, mientras que para la copa en el punto “C” ronda los 2.5 – 3 dB, y en el punto “D” ronda los 7 – 7.5 dB.
- Para bandas de frecuencias situadas en 3.3 GHz las pérdidas de inserción producidas en el tronco ronda los 2.5 – 3 dB, mientras que para la copa en el punto “C” ronda los 4.5 – 5 dB, y en el punto “D” ronda los 9 dB.
- Para bandas de frecuencias situadas en 5.5GHz las pérdidas de inserción producidas en el tronco ronda los 5 – 5.5 dB, mientras que para la copa en el punto “C” ronda los 5.5 – 6 dB, y en el punto “D” ronda los 10.5 – 11 dB.

7.11 Escenario 11: Abeto

Este escenario que vamos a caracterizar es un abeto cuyo nombre específico de especie es Tuya Oriental, "Platyclusus Orientalis". Este escenario está situado en una urbanización del barrio de Montecarmelo en Madrid.

7.11.1 Estructura, dimensiones y puntos de análisis



Figura 7.11.1 y 7.11.2: Diferentes vistas del abeto

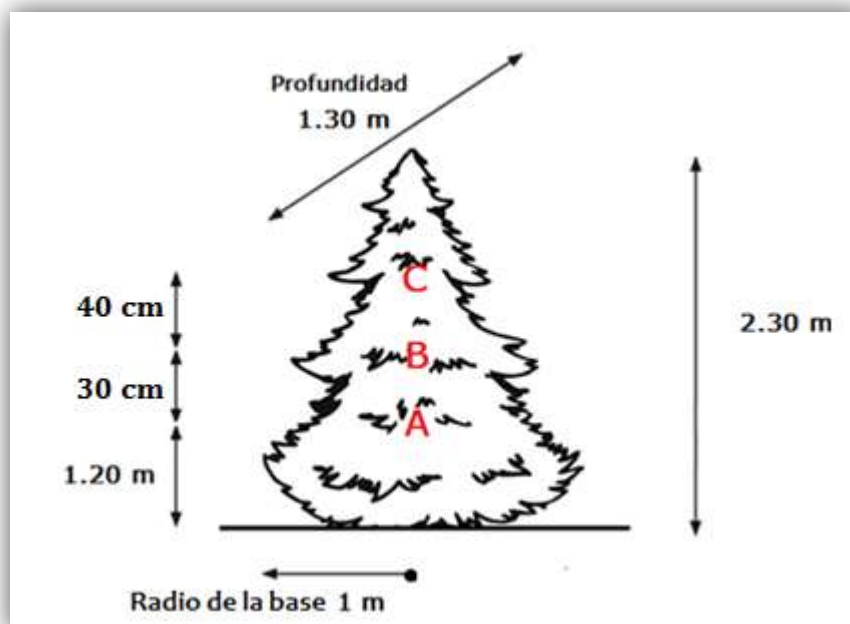


Figura 7.11.3: Dimensiones y puntos de análisis del escenario

7.11.2 Teoría aplicada: Modelización de la estructura

En este escenario nos encontramos con un abeto, el cual no dispone de tronco y tiene una estructura piramidal, que vamos a dividir en tres zonas.

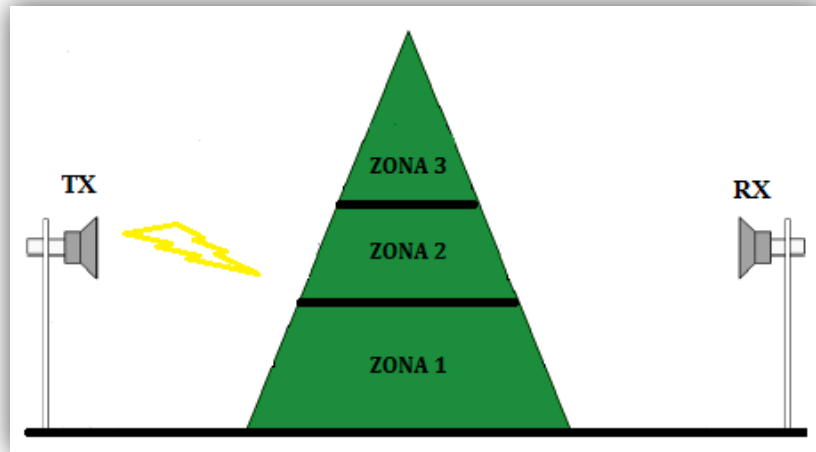


Figura 7.11.4: Zonas del abeto a caracterizar en radioenlace

Cada una de las zonas va a representar un punto de interés de medición, donde cada una de ellas tendrá un efecto diferente en la señal principal emitida a la hora de medir las pérdidas de inserción.

- **Zona 1:** Es evidente asumir que la zona 1, debida a la baja altura que se precisa en la antena para su medición, las pérdidas que se produzcan se vean afectadas por la reflexión del suelo. Así mismo en esta situación se incluirán más pérdidas al enlace, debido a que es la zona con mas abundancia de hojas tanto a lo ancho del abeto como en profundidad. Todo ello es debido al tipo de estructura piramidal que presenta el abeto
- **Zona 2:** En esta zona las pérdidas por reflexión del suelo serán menores, pero otro efecto como es la difracción, tendrá una importancia mucho más destacable. Al considerarse como una estructura geométrica piramidal, la difracción puede modelarse como en el escenario del árbol, es decir filo de cuchillo, y por lo tanto la señal principal que penetra las hojas del abeto se verá contribuida con los rayos difractados por el abeto, de tal manera que las pérdidas de inserción totales en esta zona disminuirán con respecto a la zona más baja.
- **Zona 3:** En esta última zona se intensificará n los efectos de la zona 2, no solo por la altura, sino por la poca abundancia de hojas y por estar casi en el pico de la pirámide, donde la difracción será mucha más intensa en recepción.
- Igualmente otros efectos como la absorción o el tipo de hojas y su abundancia, serán datos a considerar al problema, y por supuesto serán fenómenos que aumenten significativamente las pérdidas de inserción con respecto otros escenarios.

7.10.3 Resultados y análisis del escenario

- Como en casos anteriores vamos a exponer varias graficas con las pérdidas de inserción obtenidas, para los puntos de interés: A, B y C, para la orientación de 0° entre antenas, en las tres bandas de frecuencia disponibles, y sus respectivas polarizaciones.

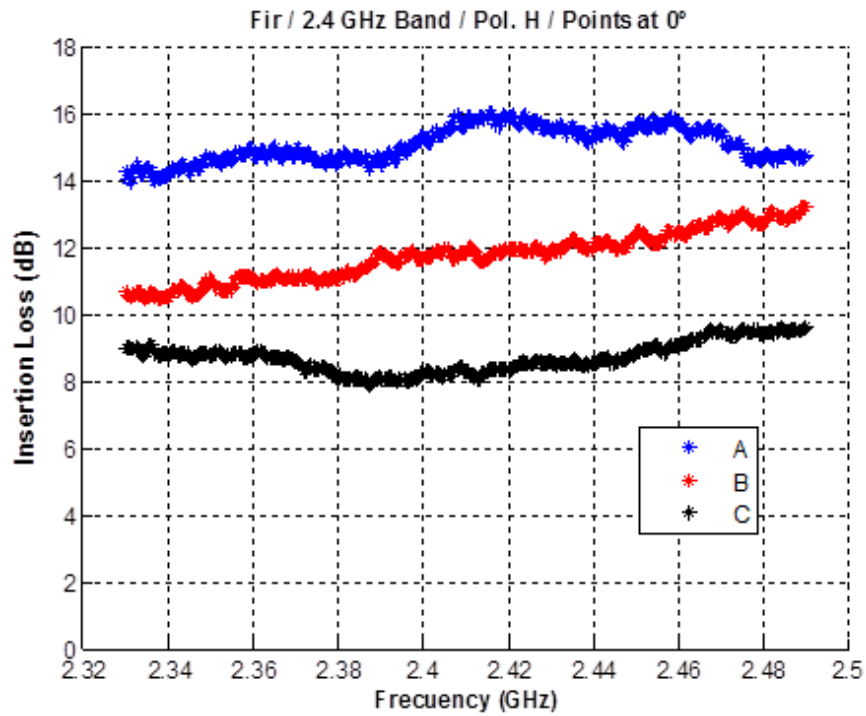


Figura 7.11.5: Medida en 2.4 GHz en los tres puntos en 0° para la Polarización Horizontal

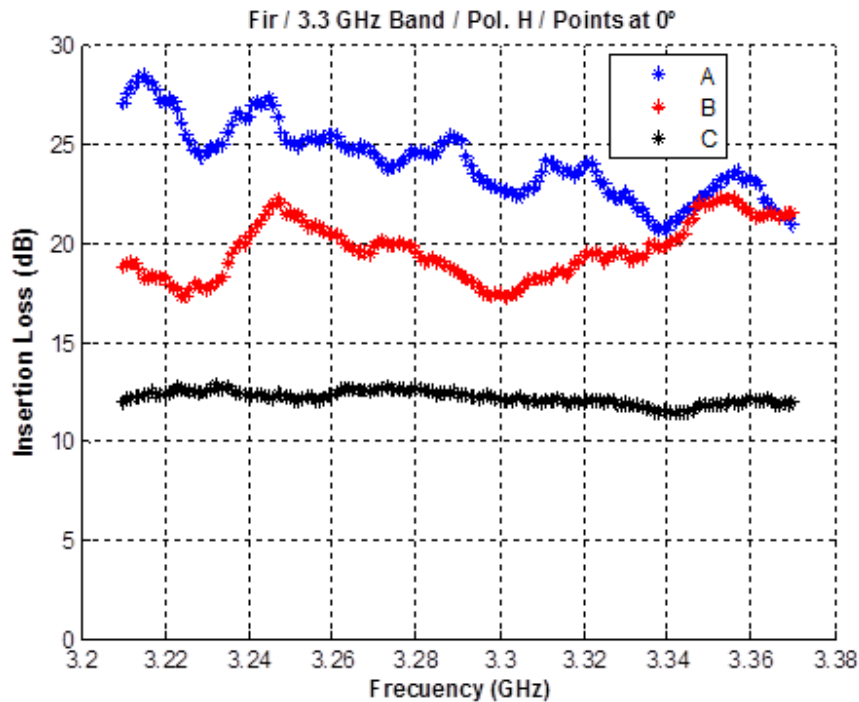


Figura 7.11.6: Medida en 3.3 GHz en los tres puntos en 0° para la Polarización Horizontal

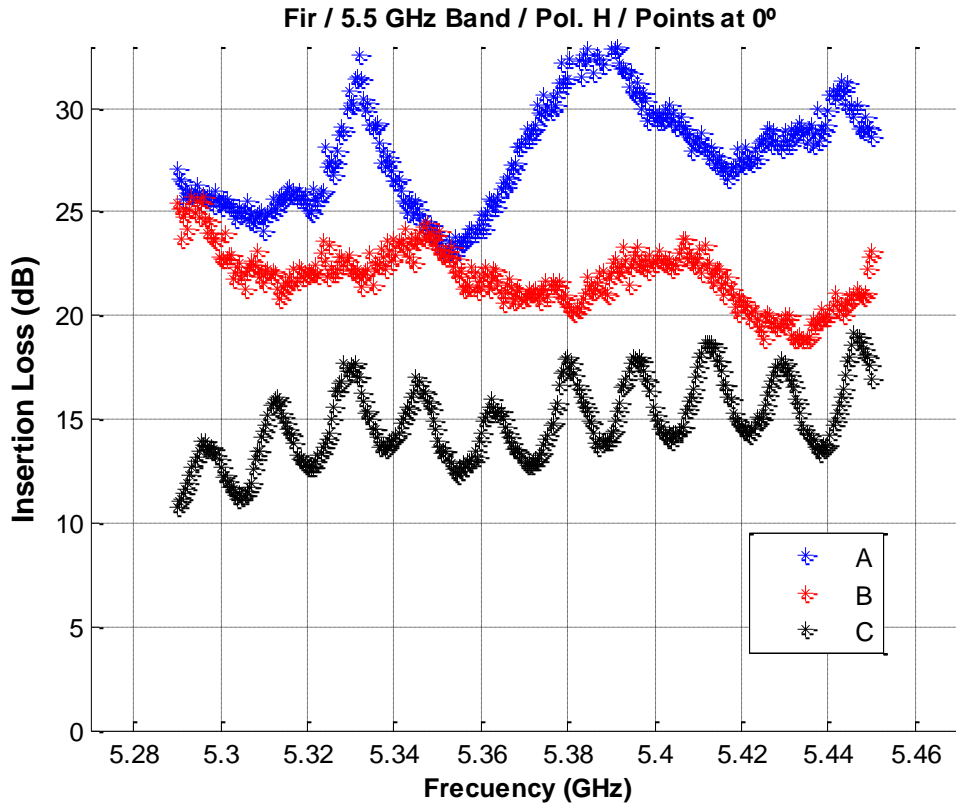


Figura 7.11.7: Medida en 5.5 GHz en los tres puntos en 0° para la Polarización Horizontal

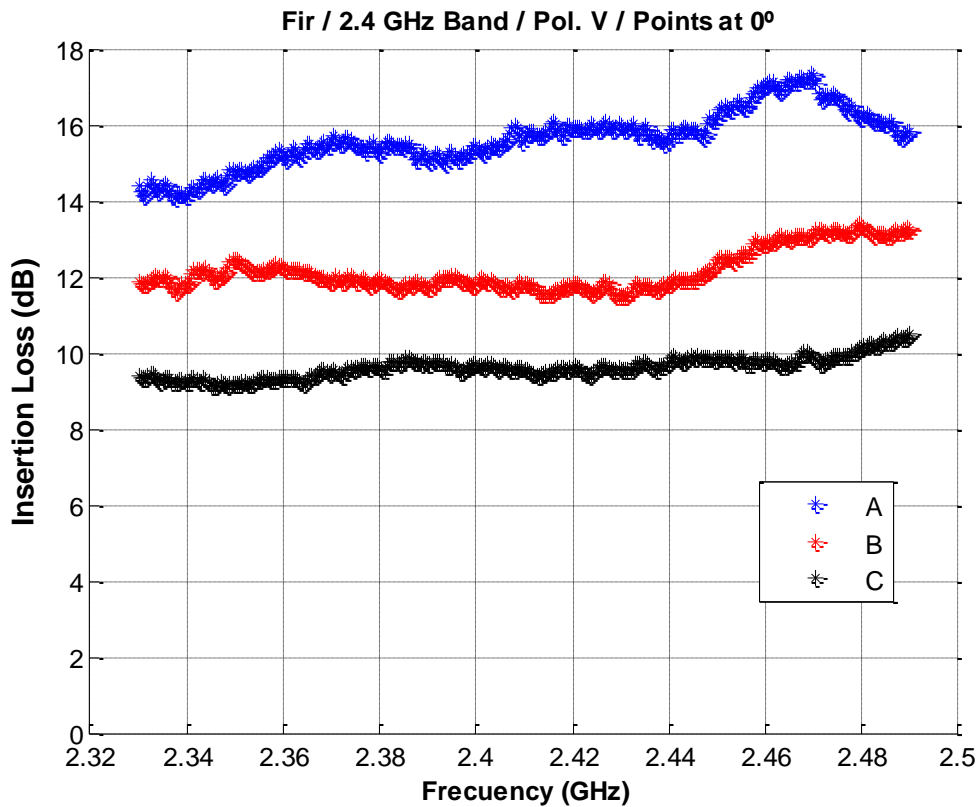


Figura 7.11.8: Medida en 2.4 GHz en los tres puntos en 0° para la Polarización Vertical

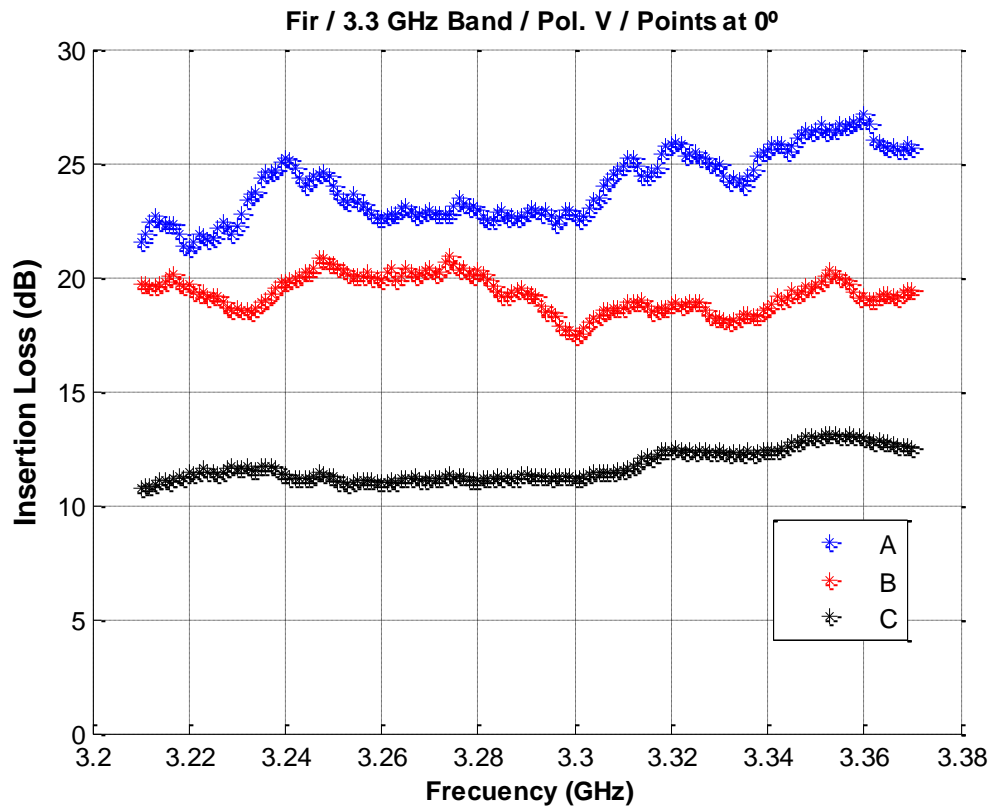


Figura 7.11.9: Medida en 3.3 GHz en los tres puntos en 0° para la Polarización Vertical

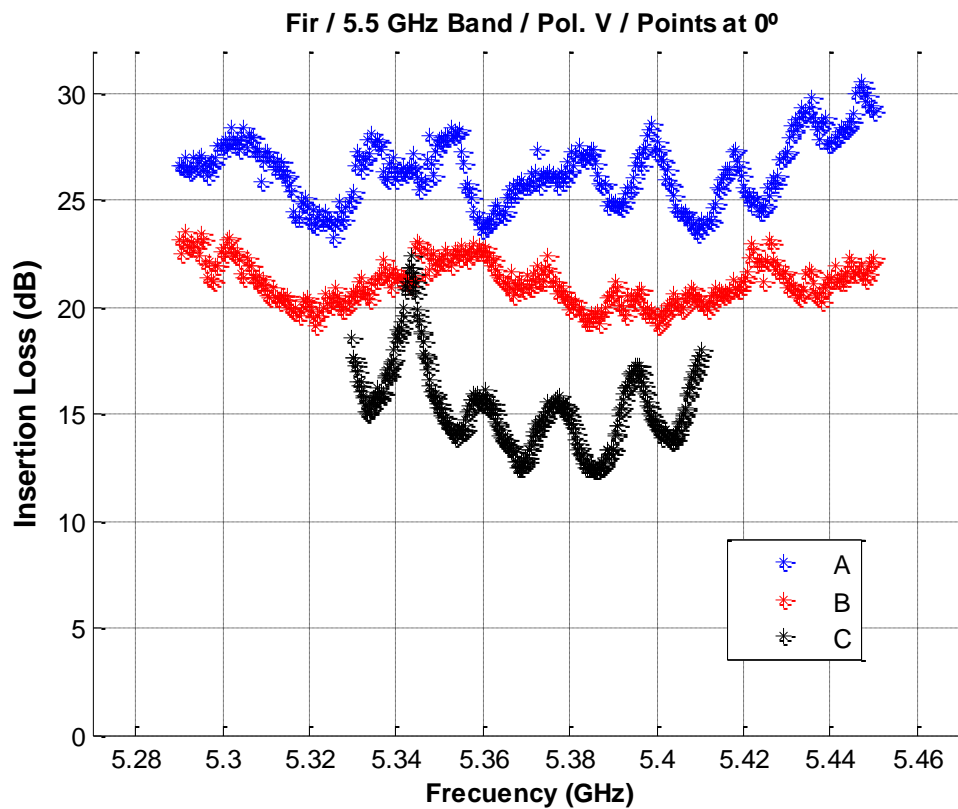


Figura 7.11.10: Medida en 5.5GHz en los tres puntos en 0° para la Polarización Vertical

- A continuación vamos a realizar las medidas en los diferentes ángulos, como se realizó en escenarios anteriores, para caracterizar de mejor manera la dispersión:

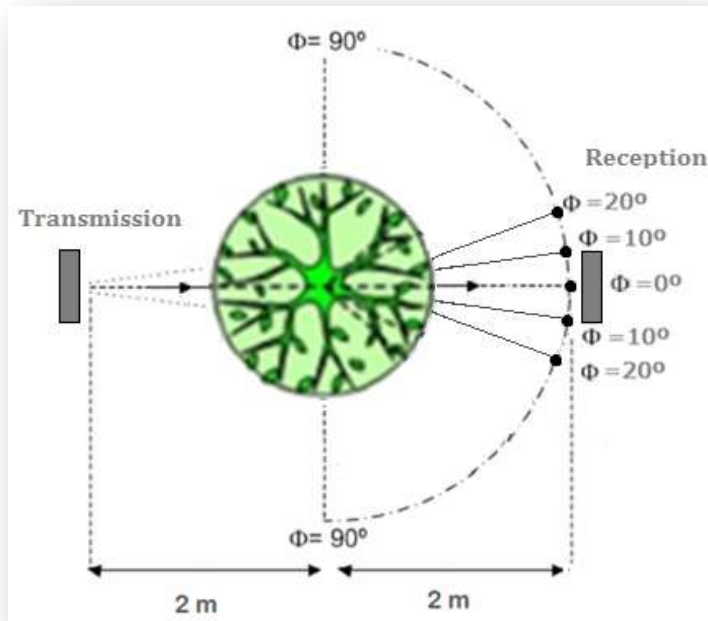


Figura 7.11.11: Modelo de transmisión para diferentes ángulos de recepción

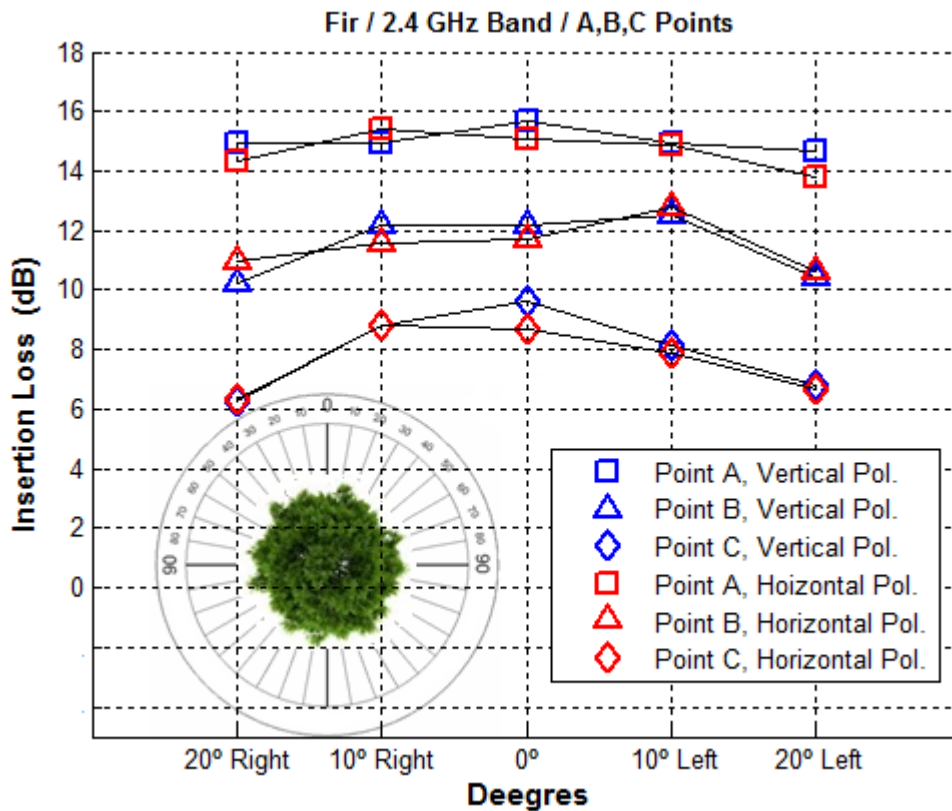


Figura 7.11.12: Medidas para cada ángulo de recepción en la banda 2.4 GHz

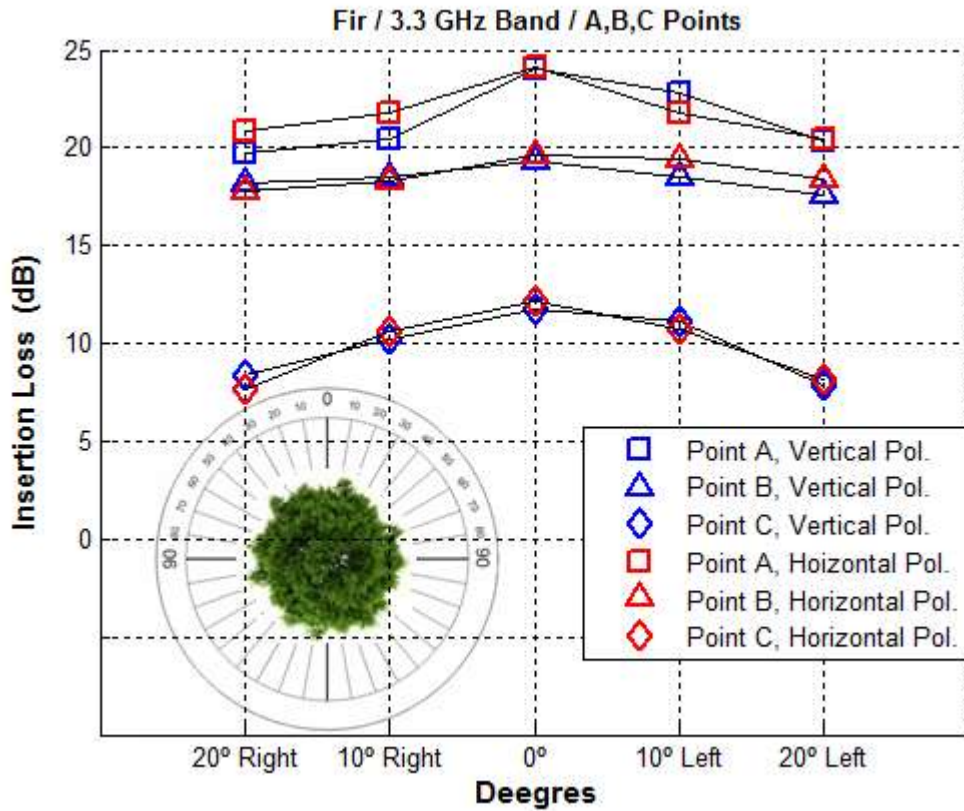


Figura 7.11.13: Medidas para cada ángulo de recepción en la banda 3.3 GHz

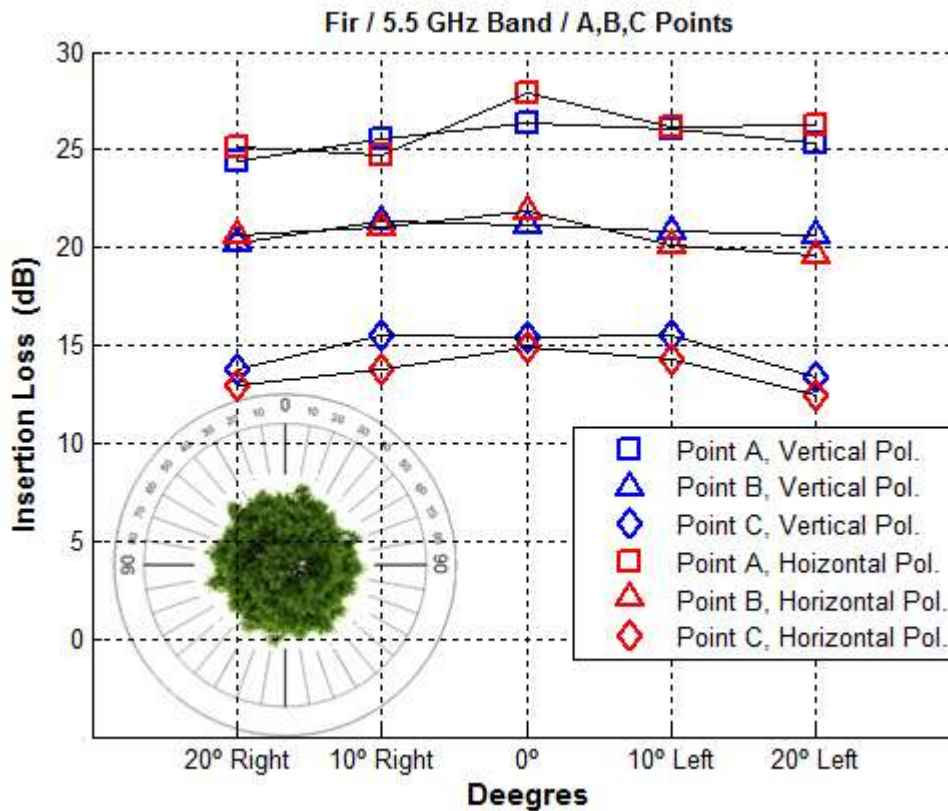


Figura 7.11.14: Medidas para cada ángulo de recepción en la banda 5.5 GHz

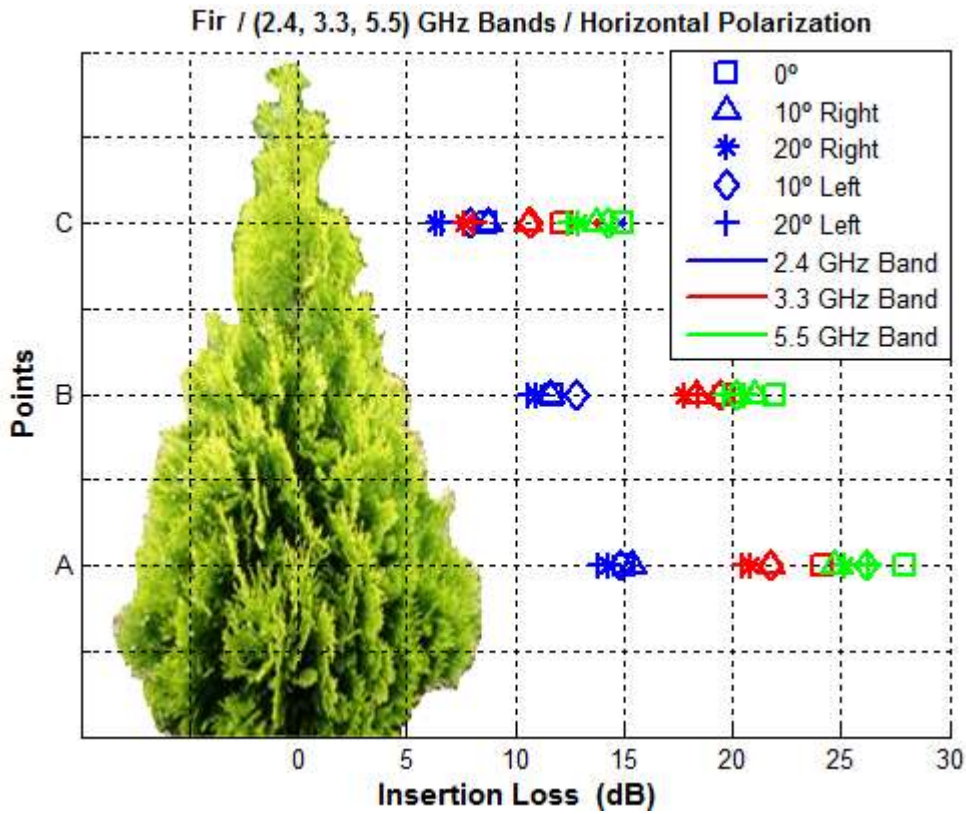


Figura 7.11.15: Medidas en las tres bandas para todos los puntos en Polarización Horizontal

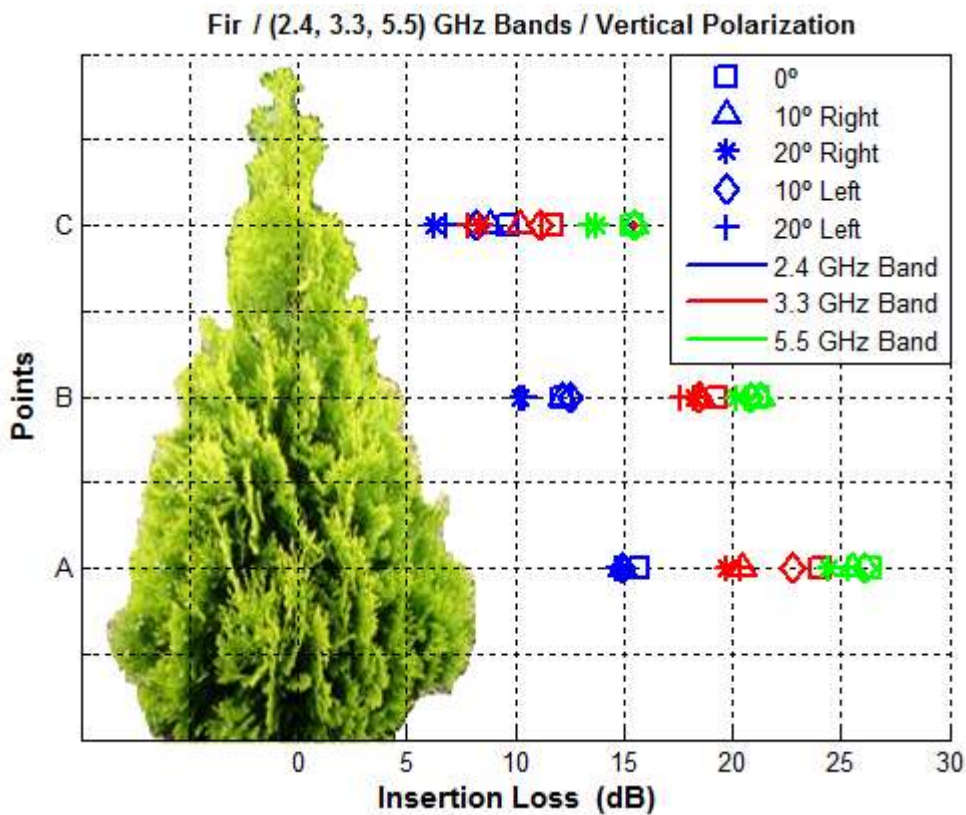


Figura 7.11.16: Medidas en las tres bandas para todos los puntos en Polarización Vertical

7.11.4 Conclusiones

Como se ha comentado, el obstáculo es un abeto, el cual no dispone de tronco y tiene una estructura piramidal, que se divide en tres zonas que hemos analizado por separado. Hemos observado que para cada una de ellas varía el nivel de pérdidas de inserción.

- **Zona 1:** Al estar situada a baja altura, las pérdidas que se producen se ven afectadas por la reflexión del suelo pero sobre todo por la abundancia de hojas tanto a lo ancho del abeto como en profundidad. Por lo tanto tiene sentido que sea la zona con mas perdidas de inserción.
- **Zona 2:** En esta zona las pérdidas por reflexión del suelo son menores, y además la difracción es más destacable ya que la anchura del abeto es más estrecha. Las pérdidas de inserción en esta zona disminuyen con respecto a la zona anterior, y por lo tanto verifica los efectos anteriormente descritos.
- **Zona 3:** En esta última las pérdidas obtenidas son menores, y esto se debe no solo a la altura del abeto donde cada vez es más estrecho y la difracción más pronunciada, sino también por la disminución en la abundancia de hojas.

También hemos observado que es más alto el nivel de perdidas con respecto a la palmera o al árbol, esto se debe a los diversos efectos como la absorción o el tipo de hojas o su abundancia, que serán fenómenos que aumenten significativamente las pérdidas de inserción.

Por último destacar que a diferentes ángulos de recepción, nos hemos encontrado menos pérdidas que con respecto al ángulo de 0º, cosa que no ocurría en ningún escenario anterior como la palmera o el árbol. Esto es debido a que, como el abeto tiene una disposición piramidal, cuando variamos el ángulo de recepción, estamos dejando la línea de vista de las antenas sin ningún tipo de obstrucción y esto ocurre sobretodo en la zona 3, donde existe la obstrucción del abeto es mucho más estrecha.

– Los resultados obtenidos para el abeto en 0º son los siguientes:

- Para bandas de frecuencias situadas en 2.4 GHz las pérdidas de inserción producidas en el punto “A” ronda los 15 – 15.5 dB, en el punto “B” ronda los 12– 12.5 dB, y en el punto “C” ronda los 9 – 9.5 dB.
- Para bandas de frecuencias situadas en 3.3 GHz las pérdidas de inserción producidas en el punto “A” ronda los 24 dB, en el punto “B” ronda los 19 – 20 dB, y en el punto “C” ronda los 11 – 12 dB.
- Para bandas de frecuencias situadas en 5.5 GHz las pérdidas de inserción producidas en el punto “A” ronda los 26 – 28 dB, en el punto “B” ronda los 21 – 22 dB, y en el punto “C” ronda los 15 dB.

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

▪ Conclusiones generales del proyecto

En las tecnologías inalámbricas, es imprescindible realizar un estudio de la propagación en las bandas utilizadas en estos sistemas para la correcta implantación de dicho sistema, ya que el estudio nos proporciona datos y, por lo tanto, herramientas de estimación que serán muy útiles y previas en su implantación, y que ahorrara esfuerzos y gastos, tanto a nivel económico como a nivel de tiempo de ejecución. El estudio de la propagación para estas bandas ha sido por tanto el objetivo principal de este Proyecto Fin de Carrera.

Para cada escenario se ha realizado un exhaustivo estudio de las pérdidas producidas en los obstáculos analizados y de los fenómenos o efectos que se producen en la señal al atravesarlos, y que afectarán en gran medida en las medidas observadas para cada uno de ellos.

Para el análisis, como se ha estado observando a lo largo del proyecto, se ha establecido un aparato exclusivo dentro de cada campaña para realizar las conclusiones pertinentes y específicas de cada escenario y del obstáculo. Donde en ellas se destacan las pérdidas de inserción obtenidas, fenómenos o efectos en la señal al atravesarlos estos materiales, o el nivel de repercusión para el ingeniero, el cual tendrá que tener en cuenta al establecer un radioenlace para ofrecer una determinada cobertura en una zona específica, con algún tipo de tecnología inalámbrica deseada.

Aun teniendo estas conclusiones específicas e individuales de cada escenario, vamos a exponer, a modo de resumen, los aspectos más importantes que hemos ido observando en la campaña, y que en nuestro caso nos ha parecido importante recordar y recalcar:

- En cuanto a las antenas escogidas para el estudio, hemos concluido que se debe realizar una comprobación previa de la banda de trabajo útil que poseen cada antena, de tal manera que la banda de trabajo sea pertinente y efectiva para el estudio. Así también la comprobación de las características que poseen para la elección del desempeño que tendrán con respecto a, posicionarlas en recepción o en transmisión, será muy adecuado, siempre que no se especifique ya en algún tipo de especificaciones de las mismas. Así mismo también será importante comprobar la ganancia teórica de cada antena.
- Para la correcta medición de las pérdidas en el escenario, se debe realizar una buena calibración previa del mismo, de tal manera que las medidas obtenidas en el analizador no se vean afectadas, y sean meramente propias del obstáculo en sí.
- Una correcta distancia de separación entre obstáculo y antena puede ser decisiva para una buena caracterización de las pérdidas de inserción. Por ejemplo, la reflexión en el metal o en el cristal, ha sido muy destacable a la hora de la realización de las medidas. Mantener esa cierta distancia entre antena y objeto ha sido vital, ya que se necesitaba evitar la interferencia entre señales reflejadas y la señal principal. Otro factor es la difracción, como ocurrió en la columna, donde dependiendo de la distancia entre el obstáculo y la receptora, los rayos difractados en ella que doblan las esquinas de la columna, se presentarán en menor cantidad dependiendo de esa distancia. Y por lo tanto un cambio en la distancia puede producir ciertos falseos en la caracterización de las pérdidas que se ofrecen al atravesar el obstáculo.

- Otra medida destacable, y de la que nos hemos percatado, es la de mantener una cierta altura mínima entre la antena y la superficie del suelo. El efecto por reflexión en el suelo es una contribución a la señal, y esta afecta en el falseo de la medida. Por ello es importante evitar efectos de multitrayecto, donde contribuciones de señal van a afectar a la principal, y por lo tanto van a desembocar a malas caracterizaciones del obstáculo. Otros efectos de multitrayecto también pueden darse en laterales o techo del escenario como pasa, por ejemplo, en un lateral del “Muro de ladrillo” o el techo de “La columna”, los cual obliga a mantener una máxima distancia de medición o, en el caso de laterales, focalizar las medidas en el medio del obstáculo.

A veces estas soluciones son inviables, donde el efecto del multitrayecto tiene que considerarse si o si. Es el caso del “Pasillo con tres puertas”, donde estos efectos de reflexión y contribuciones de señal se van a dar siempre, incluso simulando una guía de onda.

Todo esto obliga a l ingeniero a considerar estos factores como habituales, sobretodo en entornos indoor, pasillos, habitaciones, salas, halls, etc. y por lo tanto, tenerlos muy en cuenta a la hora de establecer un enlace.

- Además de todos estos fenómenos que se deben tener en cuenta al dimensionar el enlace en entornos indorr, también hay que percatarse de la finalidad de los mismos. Es decir, un pasillo o una sala son construidas para que en ellas estén armarios, mesas, estanterías, incluso personas. Todo esto son factores a tener muy en cuenta, ya que como hemos estudiado, “Las personas” tienen un alto nivel de impacto en las pérdidas de inserción, y hay que estimar cuantas podría haber a través del supuesto enlace.

- Sin embargo, los obstáculos encontrados en entornos outdorr, todos, como arboles o arbustos, destacan prácticamente por la dispersión y absorción que se produce en sus hojas cuando las ondas intentan atravesarlas, ya que las pérdidas al atravesar el tronco, son muy bajas y casi no se deben tener en cuenta. Por tanto, es muy indicado percatarse del tipo climatología en exteriores a la hora de implementar un enlace, ya que, como vimos en el “Árbol sin hojas”, en otoño, al no estar prevista la copa de hojas, las pérdidas de inserción por dispersión ya no se asumen, y solo se tienen en cuenta los efectos de difracción que sufren las diversas ramificaciones del tronco las cuales tendrán un carácter poco significativo.

Otro punto, es el tipo de hoja, donde dependiendo de su abundancia o su dimensión y estructura, el tipo de dispersión podrá ser más pronunciado. Esto lo observamos en la “Palmera”, la cual, al tener pocas hojas grandes y planas, la dispersión era más alta y aleatoria. O también en el “Abeto”, que gracias a la abundancia de hojas y al ser de diferente estructura a las caducas, y ser perennes con otro tipo de nivel de absorción, las pérdidas producidas son más altas que en el “Árbol” o “Palmera”.

- Es importante una elección variada de puntos de medición, ya que dependiendo del obstáculo y su estructura, habrá zonas donde las pérdidas varíen de forma destacable. El objetivo del proyecto es proporcionar unas pérdidas de referencia del obstáculo, por lo que es importante realizar una media de las pérdidas y observar la desviación ocurrida entre todos los puntos, de tal manera que las pérdidas de referencia sean más fiables y sobretodo estimables.

Los escenarios más difíciles de caracterizar son los de dimensión pequeña, donde no se pueden elegir varios puntos de medición, y por lo tanto efectos como difracción, reflexión, o zonas de visión directa entre antenas pueden falsear la medida en si, donde solo se debería tener en cuenta la penetración del obstáculo o estructura. Es el caso de la zona alta del “Abeto”, donde el obstáculo se estrecha y se puede hasta ver la antena receptora detrás de él.

- En todas las medidas se ha observado las diferencias que se dan entre polarizaciones diferentes. Nos hemos percatado que dependiendo de la estructura y el material del obstáculo las pérdidas para cada polarización podrán variar.

Por ejemplo, para “la Rejilla”, al ser perfectamente geométrica y simétrica, el cambio de polarización no varía en la medida, pero en una estructura de ladrillos rectangulares, como “El muro de ladrillo” existen diferencias entre la polarización vertical o horizontal. Por ello creemos que es importante ampliar el estudio reflejando los dos tipos de polarizaciones.

Otro motivo por el cual se ha decidido este estudio en dos polarizaciones, es el posible caso de que los datos ofrecidos quieran ser tenidos en cuenta por otra persona, la cual, podría darse el caso, de que solo poseyera antenas de una única polarización, y los datos, para él, no pudieran ser fiables.

- En casi todos los escenarios podemos concluir que a más frecuencia, mas pérdidas de inserción, donde en bandas de baja frecuencia como 2.4 GHz, con el paso de pequeñas frecuencias, el nivel de atenuación no variaba tanto unas de otras. Sin embargo a altas frecuencias, se observan muchos picos de diferentes niveles con el paso de frecuencias, lo que supone una clara dificultad de caracterización, a la hora de estimar una pérdida de inserción de referencia.

Hay que señalar que para la “Rejilla” no sucedía lo de “a más frecuencia más pérdidas”, debido a que su modelización se concluyó como un modelo de filtro paso banda con una frecuencia de resonancia situada en la banda intermedia 3.3 GHz.

- Por último señalar, que en la siguiente hoja, hemos querido completar las conclusiones del proyecto indicando en una tabla las pérdidas de inserción orientativas que el ingeniero debe tener en cuenta, y así tener una referencia del tipo de atenuación que suponen diferentes materiales o estructuras a la hora de dimensionar un enlace inalámbrico en una zona determinada.

Tabla 2: Tabla orientativa de las pérdidas de inserción en diferentes materiales

Tipo de material del obstáculo ¹	Pérdidas de inserción de referencia ² (dB)		
	2.4 GHz	3.3 GHz	5.5 GHz
Metal ³	37	42	47
Cristal doble ⁴	3	4	7
Muro de hormigón ⁵	8	12	16
Tres Puertas de Madera ⁶	3	4	5
Ser humano ⁷	8	12	16
Columna de hormigón ⁸	15	20	28
Tronco de árbol ⁹	2	3	5
Copa con hojas árbol ¹⁰	3	7	12
Copa sin hojas árbol ¹¹	3	4	5
Pino-Abeto ¹²	12	15	25
Copa de palmera ¹³	7	9	11

¹ Obstáculos. Medidos para diferentes materiales a 1 m entre antena y obstáculo mientras que para arboles u otras vegetaciones se usa una distancia de 2 m. Esta distancia se establece tanto en recepción como en transmisión.

² Pérdidas de inserción de referencia. Se expone una referencia de atenuación aproximada que se produce al atravesar un obstáculo o material determinado en el radioenlace para diferentes bandas de operación.

³ Metal. Perteneciente a una puerta, de grosor 16 cm. Dimensión grande.

⁴ Cristal Doble. De dimensiones altas. Incorpora entre los dos cristales una cámara de aire. Grosor total (2+8+3) mm.

⁵ Muro de hormigón. Está recubierto de ladrillo. Su grosor es de 63 cm. Dimensión grande.

⁶ Tres Puertas de madera. El escenario tiene un pasillo rectangular con 3 puertas de madera separadas entre ellas por una cierta distancia de unos metros. Todas las puertas tienen un grosor de 8 cm.

⁷ Ser humano. Una persona estándar adulta de unos 1.75 m de altura.

⁸ Columna de hormigón. Tiene estructura cuadrada y está recubierta de ladrillo. Cada lado 50 cm.

⁹ Tronco de un árbol. Estructura cilíndrica de 12.5 cm de radio.

¹⁰ Copa con hojas de un árbol. Estructura de la copa cuasi circular de un radio de 1m. aprox.

Hojas pequeñas caducas en proporción abundante y ramificaciones.

¹¹ Copa sin hojas del árbol. Misma estructura que la anterior pero sin hojas.

¹² Pino tipo abeto. Estructura piramidal sin tronco. Radio de la base 1m. Profundidad de 1.30 m. Altura 2.30m.

¹³ Copa de una palmera. Estructura de copa cuasi elíptica de “radio a” de 70 cm aprox. y “radio b” de 1.10 m aprox. Hojas grandes, circulares, planares y finas.

▪ Trabajo Futuro

Se propone como trabajo futuro, los siguientes temas a tratar:

- Realizar una campaña de medidas en interiores, midiendo las pérdidas introducidas por más tipos de materiales u obstáculos de los que ya se han realizado.
- Realizar una campaña de medidas en exteriores, midiendo las pérdidas introducidas por más tipos de árboles, arbustos, plantas y otros tipos de vegetación.
- Realizar una campaña de medidas en exteriores en distintas condiciones ambientales como lluvia, viento, temperatura o diferentes estaciones del año que influyan en la vegetación.
- Realizar campaña de medidas a través de altas profundidades de vegetación o a través de varios árboles seguidos.
- Realizar una campaña de medidas en la cámara anecoica, de las pérdidas de inserción de distintos materiales o plantas, para simular situaciones ideales.
- Realizar algún tipo de campaña, como las citadas en esta lista, a otras bandas de frecuencia de operación.
- Realizar algún tipo de campaña, como las citadas en esta lista, con diferentes antenas y características de ganancia u orientación.

■ Referencias

- [1] Wi-Fi Alliance® and Wireless Gigabit Alliance Finalize Unification, visit www.wi-fi.org/
- [2] IEEE 802.11TM Wireless Local Area Networks, The Working Group for WLAN Standards, visit www.ieee802.org/11
- [3] Blog de la Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones CMT blog
- [4] Wimax Forum www.wimaxforum.org/ WiMAX deployments visit www.WiMAXMaps.org.
- [5] M. G. Roozbahani and E. Jedari, A. A. Shishegar, “A new link-level simulation procedure of wideband MIMO radio channel for performance evaluation of indoor WLANS”, Progress In Electromagnetics Research, PIER 83, 13–24, 2008.
- [6] Tayebi, J. Gomez, F. Saez de Adana, and O. Gutierrez, “The application of ray-tracing to mobile localization using the direction of arrival and received signal strength in multipath indoor environments”, Progress In Electromagnetics Research, PIER 91, 1–15, 2009.
- [7] H. L. Bertoni, “Radio propagation for modern wireless systems”, Prentice Hall PTR, New Jersey, 2000.
- [8] T. S. Rappaport, “Wireless communications”, Prentice Hall PTR, New York, 1996.
- [9] S. R. Saunders, “Antennas and propagation for wireless communication systems”, J. Wiley & Sons, New York, 1999.
- [10] A. Kara, “Human body shadowing variability in short-range indoor radio links at 3–11 GHz band”, International Journal of Electronics, Vol. 96, No. 2, 205–211, February 2009.
- [11] A. Kara, and H. L. Bertoni, “Effect of people moving near short-range indoor propagation links at 2.45 GHz,” Journal of Communications and Networks, Vol. 8, No. 3, 286-289, September 2006.
- [12] B. Taha Ahmed, D. F. Campillo, and J. L. Masa Campos, “Short Range Propagation Model for a Very Wideband Directive Channel at 5.5 GHz Band”, Progress In Electromagnetics Research, Vol. 130, 319- 346, 2012.
- [13] J. Choi, N.-G. Kang, J.-M. Ra, J.-S. Kang, and S.-C. Kim” Effect of metal door on indoor radio channel”, the 18th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'07), pp. 1-5, 2007.
- [14] K. L. Chee, A. Anggraini, T. Kaiser, T. Kürner, “Outdoor-to-Indoor Propagation Loss Measurements for Broadband Wireless Access in Rural Areas”, Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), pp. 1376 – 1380, 2011.
- [15] L. Nagy, “FDTD and Ray Optical Methods for Indoor Wave Propagation Modeling”, Microwave Review, pp. 47-53, July 2010.
- [16] Navy Electricity and Electronics Training Series. U.S. Navy. 1998 Introduction to Wave Propagation, Transmission Lines and Antennas. Visit www.hnsa.org
- [17] Marcuvitz, N., Waveguide Handbook Radiation Laboratories Series, McGraw Hill, 1951
- [18] Lee, S. W., Zarrillo, G., Law, C. L., Simple Formulas for Transmission Through Periodic Metal Grids or Plates IEEE Trans. AP, vol 30, no. 5, Sept. 1982, pp 904 – 909.
- [19] Lo, Y. T., Lee, S. W., Antenna Handbook. Theory Applications and Design Van Nostrand Reinhold, 1988, pp 2-13 – 2-16.
- [20] Munk, B.A. Frequency Selective Surfaces. Theory and Design. John Wiley Sons, Canada 2000.

- [21]Wu, T.K. Frequency Selective Surfaces and grid array. John Wiley Sons. Canada 1995.
- [22]Benjamin Hooberman, “Everything You Ever Wanted to Know About Frequency-Selective Surface Filters but Were Afraid to Ask”, May 2005.
- [23]UIT R-REC-P.833. - Unión internacional de telecomunicaciones
- [24]UIT-R P.526. - Unión internacional de telecomunicaciones
- [25]UIT-R P.1238. - Unión internacional de telecomunicaciones
- [26]Time-Variant Radio Channel Characterization and Modelling of Vegetation Media at Millimeter-Wave Frequency. Sérgio Morgadinho, Member, IEEE, Rafael F. S. Caldeirinha, Miqdad O. Al-Nuaimi, Iñigo Cuiñas, Member, VOL. 60, NO. 3, MARCH 2012 1557
- [27]Electromagnetic Wave Scattering from Some Vegetation Samples Mostafa A. Karam, memberj,EEE, Adrian K. Fung, Fellowi, EEE,and Yahia M. M. Antar, senior member, IEEE

APÉNDICE A: ANEXOS

▪ Anexo 1: Especificaciones de las antenas de 2.4 GHz



COMMUNICATION ANTENNAS - Panel Antennas

2.4GHz Panel Antennas

Applications

- Indoor/Outdoor Application
- Indoor/Outdoor Application
- Point-to-point
- Point to multipoint
- 802.11b/g Application
- WiFi Application

Features

- Designed for long distance wireless communications
- Designed to obtain maximum gain
- Frequency: 2400MHz to 2485MHz
- Made with waterproof and corrosion resistant material
- Fixed mounting kit Included
- Connectorization as per requirement

Technical Specifications

PARAMETERS	SPECIFICATION
Product Type	2.4 GHz Panel Antenna 18dBi
Model No	TW / 2.4 PANEL / 18 dBi /
Electrical Specifications	
Frequency Range	2.4 GHz \diamond 2.5 GHz
Gain	18 dBi
Impedance	50 Ohms
VSWR	>1.5
HPBW	Horizontal: 20° ,Vertical : 20 \diamond
F/B	>24 dB
Power Handling	25 Watt
Radiation	Directional
Polarization	Vertical / Horizontal
Ground	Direct Ground
Environment & Mechanical Characteristics	
Connector	N female
Radome	ABS
Temperature	-40° C to 85°C
Humidity	95%
Size (L x W x H)	110 x 110 x 20 mm
Weight	0.28 Kg

▪ Anexo 2: Especificaciones de las antenas de 3.3 GHz



COMMUNICATION ANTENNAS - Panel Antennas

3.3GHz Panel Antennas

Applications

- Indoor/Outdoor Application
- Indoor/Outdoor Application
- Point-to-point
- Point to multipoint
- 802.11b/g Application
- WiFi Application

Features

- Designed for long distance wireless communications
- Designed to obtain maximum gain
- Frequency: 3.3GHz to 3.4GHz
- Made with waterproof and corrosion resistant material
- Fixed mounting kit Included
- Connectorization as per requirement

Technical Specifications

PARAMETERS	SPECIFICATION
Product Type	3.3 GHz Panel Antenna 18 dBi
Model No	TW / 3.3 / PANEL / 18 dBi /
Electrical Specifications	
Frequency Range	3.3 GHz to 3.4 GHz
Gain	18 dBi
Polarization	Vertical / Horizontal
VSWR	>1.5
F/B Ratio	> 24 dB
Power Handling	25 Watt(CW)
Radiation	Directional
HPBW	Horizontal: 20° Vertical : 20°
Impedance	50 Ohms
Ground	Direct Ground
Environment & Mechanical Characteristics	
Connector	N female (As per Requirement)
Radome	ABS
Temperature Range	-40° C to 85°C
Humidity	95%
Size (L x W x H)	110 x 110 x 20 mm
Weight	0.28 Kg

▪ Anexo 3: Especificaciones de las antenas de 5.5 GHz



www.L-com.com

5.4 GHz to 5.8 GHz 19 dBi Wireless LAN Flat Patch Antenna

Model: HG5419P

Applications and Features

Applications:

- **5.4 GHz Frequency Range:**
 - ◊ 5.4 GHz Band Applications
 - ◊ Unlicensed European 5.4 GHz Band Applications
 - ◊ IEEE 802.11a Wireless LAN
 - ◊ WiFi Systems
 - ◊ Radio Local Area Networks (RLAN)
 - ◊ Fixed Wireless Access Systems (FWA)
 - ◊ WiMAX Technology
- **5.8 GHz Frequency Range:**
 - ◊ 5.8GHz UNII applications
 - ◊ 5.8GHz ISM applications
 - ◊ 5.8GHz Wireless LAN systems
 - ◊ WiFi Systems
 - ◊ 5.8 GHz Wireless Video Systems

Features:

- 19 dBi
- Light weight
- All weather operation
- Compact Size
- Heavy-duty radome
- DC Short lightning protection
- Integral N-Female Connector
- Can be installed for either vertical or horizontal polarization
- Includes tilt and swivel mast mount
- RoHS Compliant



Description

Superior Performance

This heavy duty compact flat panel WiFi antenna is ideal for 5.4GHz 802.11a band applications as well as 5.8GHz applications in the European unlicensed 5.4 GHz band. The antenna measures 7.45" (189mm) square and combines 19 dBi gain with broad coverage. It is suitable for both indoor and outdoor applications. This antenna can be oriented for either vertical or horizontal polarization.

Rugged and Weatherproof

This WiFi antenna features a heavy-duty UV-stable white fiberglass radome for all-weather operation. The HG5419P antenna is supplied with a tilt and swivel mast mount kit. This allows installation at various degrees of incline for easy alignment. It can be installed for vertical or horizontal polarization.

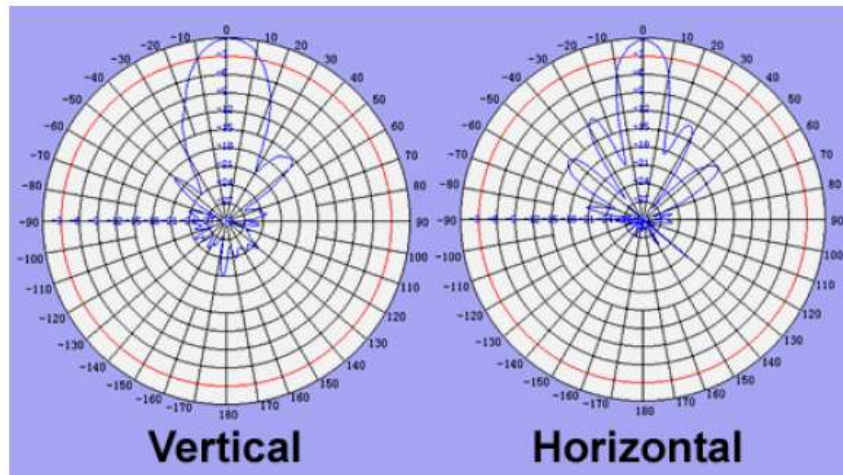


L-COM, INC. 45 BEECHWOOD DRIVE NORTH ANDOVER, MA 01845
WWW.L-COM.COM E-MAIL: SALES@L-COM.COM PHONE: 1-800-343-1455 FAX: 1-978-689-9484
© L-com, Inc. All Rights Reserved. L-com Global Connectivity and the L-com logo are registered marks.

Specifications

Frequency	5470-5850 MHz
Gain	19 dBi
Horizontal Beam Width	16°
Vertical Beam Width	16°
Polarization	Vertical or Horizontal
Front to Back Ratio	>25 dB
Impedance	50 Ohm
Max. Input Power	50 Watts
VSWR	< 1.5:1 avg.
Lightning Protection	DC Short
Connector	Integral N-Female
Weight	1.6 lbs. (0.72 Kg)
Dimensions	7.45 x 7.45 x 1.37 inches (189 x 189 x 35 mm)
Radome Material	UV-Stable Fiberglass
Operating Temperature	-40° C to 85° C (-40° F to 185° F)
Mounting	1.25 inch (32 mm) to 3 inch (75 mm) O.D. pipe max.
Rated Wind Velocity	130mph (210km/h)
RoHS Compliant	Yes

RF Antenna Patterns



Guaranteed Quality

This product is backed by L-Com's Limited Warranty

L-COM, INC. 45 BEECHWOOD DRIVE NORTH ANDOVER, MA 01845
 WWW.L-COM.COM E-MAIL: SALES@L-COM.COM PHONE: 1-800-343-1455 FAX: 1-978-689-9484
 © L-com, Inc. All Rights Reserved. L-com Global Connectivity and the L-com logo are registered marks.

▪ Anexo 4: Especificaciones del medidor laser

Bosch DLE40 Laser Measure / Range Finder DLE 40

DLE40

Bosch DLE40 Laser Distance Measure 40m Range Metric & Imperial Measuring DLE 40

Model DLE40 Bosch

The DLE 40 Professional Laser Rangefinder is a professional entry-level tool for the most frequent measuring applications. Easy-to-use - robust - precise

Features of the Bosch DLE40 Laser Measure

Functional: all basic measuring functions available

Easy to use: one function per button

Accuracy of $\pm 1.5\text{mm}$: for precise and reliable results

Handy & robust (IP 54): a tool for craftsmen

Specifications: of the DLE40 Bosch Laser Measure

Measuring range - 0.05 to 40m

Typical measuring accuracy - $\pm 1.5\text{mm}$

Lowest indication unit - 1mm

Laser class - 2

Laser type - 635nm, < 1mW

Dust and splash water guard - IP 54

Power supply Batteries: 4 \times 1.5 V LR03 (AAA)

Rechargeable batteries: 4 \times 1.2 V LR03 (AAA)

Battery service life, approx. (lower for rechargeable batteries) - 30,000 individual measurements, 5,000 continuous measurement

Automatic switch off after approx. - 20s (laser)

5 min (tool) - Yes

Tripod adapter - 1/4"

Dimension - 100 \times 58 \times 32mm

Weight - 180g



▪ Anexo 5: Especificaciones del nivel



Product Features

- Patented sensor technology
- Measures in millimeters and meters
- Accurate to 1/10 of a degree
- Set a beep for any desired angle
- 9V battery included

Product Details

Manufacturer	M-D Building Products
Brand	M-D Building Products
Model Number	93969
Item Package Quantity	1

Dimensions and Weight

Product Dimensions	16.5 cm x 5.1 cm x 3.8 cm
--------------------	---------------------------

Controls include:

- ON/OFF - automatic shut-off if left idle for 6 minutes
- HOLD - freeze or unfreeze display readings
- LISTEN & LEVEL AUDIO - beeper will sound at level and plumb
- CALIBRATE - simple two-step calibration procedure (recommended once per day)
- Deg.,%,IN/FT - select display units
- UP/DOWN ARROWS - show direction of tilt to reach level or plumb
- LOW BATTERY - low 9V battery indicator

Dimensions are 6" x 1 1/2" x 2". Weight 7 1/2 oz. Housed in environmentally sealed polycarbonate housing. 9 volt battery provides up to 120 hours of continuous use. Smart Tool enables you to find level and plumb in two ways. For quick reference, use the sensitive acrylic bubbles. For high precision, use the digital display with amazing accuracy within 1/10 of a degree. If you're not dealing with plumb or level, Smart Tool quickly identifies any angle in 3 different modes: degrees, % slope and pitch.

**APÉNDICE B:
ARTÍCULO
PUBLICADO**

"Materials insertion loss at 2.4, 3.3 and 5.5 GHz bands"

(Progress In Electromagnetics Research M, Vol. 30, 1-10, 2013)

URL: <http://www.jpier.org/pierm/pier.php?paper=13022803>

Progress In Electromagnetics Research M, Vol. 30, 1–10, 2013

MATERIALS' INSERTION LOSS AT 2.4, 3.3 AND 5.5 GHz BANDS

Bazil Taha Ahmed*, Ignacio Alvarez Calvo,
and José Luis Masa Campos

Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid, Spain

Abstract—The insertion loss of different materials is measured at 2.4, 3.3 and 5.5 GHz bands. Directive antennas with a nominal gain of 19 dB are used in the measurement campaign. The height of the antennas has been selected to have the minimum possible reflection from around surfaces. Metallic door with porthole window, metallic grid, glass window, human beings and tree's insertion loss are measured. The metallic grid presents a band pass filter function with a resonance frequency between 3.2 to 3.3 GHz. Other materials have an insertion loss that increases with the increment of the operating frequency.

1. INTRODUCTION

In indoor communications and localization, propagation loss measurements due to miscellaneous phenomenon are of vital importance [1, 2]. Possible mechanisms of propagation are free space with and without multipath, transmission through materials, walls, floors, and diffraction.

In [3–5], the propagation loss is given for different scenarios and mechanisms. In [6–8], the human body shadowing variability in short-range indoor radio links at has been presented. A shadowing of 30 dB at 5.5 GHz can be experienced when a person cuts the LOS between the transmitting antenna and the receiving. In [6], the human body shadowing variability in short-range indoor radio links at 3–11 GHz band has been presented. A shadowing of 30 dB at 5.5 GHz can be experienced when a person cuts the LOS between the transmitting antenna and the receiving one. In [9], the effect of metal door on the indoor radio channel received signal has been studied. Three frequency

Received 28 February 2013, Accepted 15 March 2013, Scheduled 17 March 2013

* Corresponding author: Bazil Taha Ahmed (bazil.taha@uam.es).

bands namely, (850–950) MHz, (2.4–2.5) GHz and (5.1–5.3) GHz have been used in the measurement campaign. It has been noticed that the door attenuation is higher than 40 dB at the 5.2 GHz band. In [10], the outdoor-to-indoor propagation loss measurements for broadband wireless access in rural areas are given. In [11], a combination of the ray optical and FDTD methods has been used to calculate the indoor propagation loss.

The main objective of this study is to present the propagation loss due to different materials at the 2.4, 3.3 and 5.5 GHz bands. These frequencies have been chosen since that they present the frequencies at which WiFi and WiMAX work. The measured data would be very helpful to understand propagation losses at these Bands.

2. MEASUREMENT SYSTEM

A Network Analyzer (6 GHz ZVL of Rohde & Schwarz) has been used to measure the propagation loss at the (2.4, 3.3 and 5.5) GHz bands. Calibration has been carried out with cables up to 20 m long depending on the studied scenario. Directional antennas with a nominal gain of 19 dB have been used in the measurements. The transmitted power in all of the measurements was 20 dBm with a measurement dynamic range of almost 100 dB. The height of the antennas has been selected to have the minimum possible reflection from around surfaces.

3. PROPAGATION THROUGH A METALLIC DOOR WITH PORTHOLE WINDOW

Figures 1 and 2 show the metallic door with the porthole window. Measurements are given at 9 different points around and at the center of the porthole window with 25 cm diameter. The transmitting antenna was located 2 m from the metallic door. On the opposite side of the door, the receiving antenna was located also at 2 m from it. With the door totally open, calibration has been done (setting 0 dB reference level for free space propagation).

Figure 3 shows the propagation loss at the nine points of measurements for the horizontal and vertical polarizations. For the horizontal polarization, it can be noticed that the minimum propagation loss is due to the point B with 2 to 4 dB final propagation loss due to the propagation through the glass of the porthole window and the diffraction from the edge of the porthole window. The worst point is F with a propagation loss of 45 dB. For the vertical polarization the minimum propagation loss is due to the point B with 3 to 6 dB final propagation loss due to the propagation through the glass of the



Figure 1. Metallic door with porthole window.

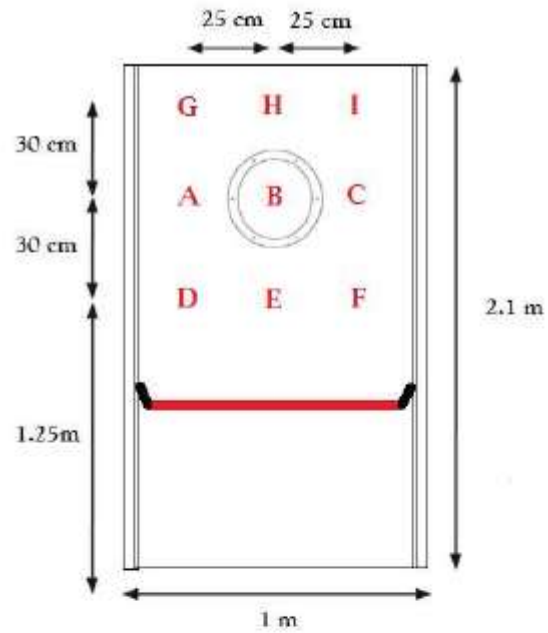


Figure 2. Measurements point of the metallic door with porthole window.

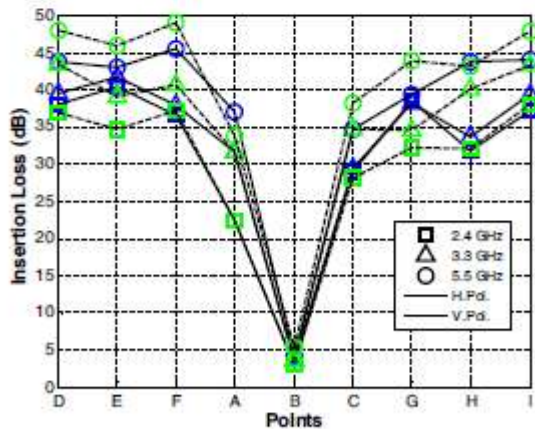


Figure 3. Insertion loss of the metallic door with porthole window for both horizontal and vertical polarization.



Figure 4. Metallic grid picture.

porthole window and the diffraction from the edge of the porthole window. The worst points are F with a propagation loss of 49 dB. Comparing these results with that of [9], it can be noticed that the insertion loss at the farthest points of our metallic door is almost the same of work [9].

4. PROPAGATION THROUGH METALLIC GRID

Figure 4 shows the metallic grid used in the measurements. It consists of many holes of $4 * 4$ cm and a metallic part of 4 cm of width. Measurements have been carried out at 36 different points.

Figure 5 shows the propagation loss for the horizontal polarization. Watching the average value of the insertion loss, a resonance effect can be noticed at 3.3 GHz with low insertion loss. In this case, the grid works as a band pass filter with a center frequency of 3.3 GHz. The resonance frequency can be expressed by:

$$f_{\text{GHz}} = 13.2/W_g$$

where W_g is the grid's hole width in cm. Here, the insertion loss has a low value of standard deviation.

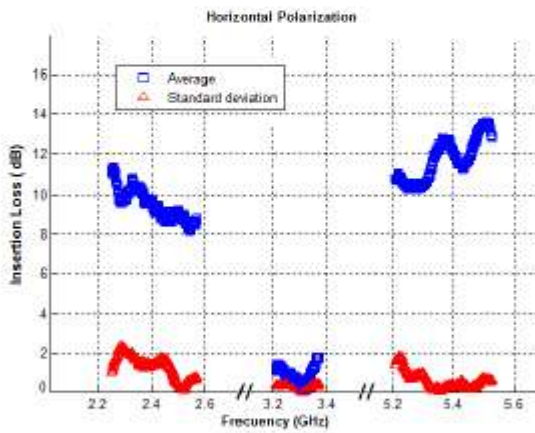


Figure 5. Metallic grid insertion loss at horizontal polarization.

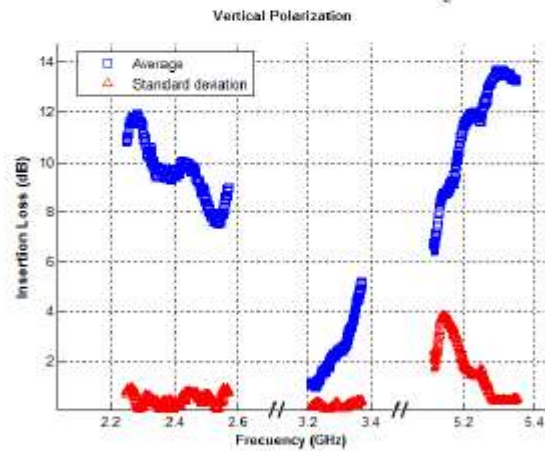


Figure 6. Metallic grid insertion loss at vertical polarization.

Figure 6 shows the propagation loss for the vertical polarization. Observing the average value of the insertion loss, a resonance effect can be noticed at 3.2 GHz with low insertion loss. In this case, the grid works as a band pass filter with a center frequency of 3.2 GHz. The resonance frequency can be expressed by:

$$f_{\text{GHz}} = 12.8/W_g$$

Here, the insertion loss has a low value of standard deviation at 2.4 and 3.3 GHz bands. Moderate value can be noticed at 5.5 GHz.

Theoretically, the resonance frequency is given by:

$$f_{\text{GHz}} = 30 / (W_g + W_m)$$

where W_m is the grid's metal width given in cm.

In our case $W_g = W_m$, thus:

$$f_{\text{GHz}} = 15 / W_g$$

The difference between the practical and the theoretical resonance frequency is maybe due to the finite gain of antennas, finite thickness of the grid and finite distance of measurements.

No other work has treated this case in our studied frequency bands.

5. PROPAGATION THROUGH GLASS WINDOW

Figure 7 shows one of the places used in the measurements with a double glass window of 2×2 m and a thickness of $(2 + 8 + 3)$ mm where the glass thicknesses are 2 mm and 3 mm, respectively, and the air gap thickness is 8 mm. In each zone of work, the insertion loss is measured at the center of the window and at four points around it.

Figure 8 shows the propagation loss for the horizontal and vertical polarizations. Let us now present the result for the horizontal



Figure 7. Glass window picture.

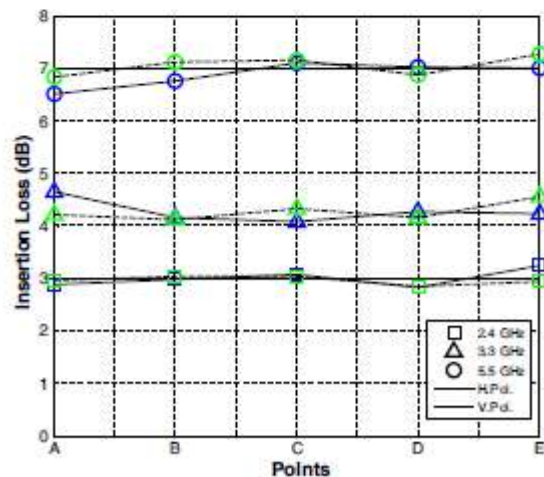


Figure 8. Insertion loss of the glass window for both horizontal and vertical polarization.

polarization. At 2.4 GHz, an insertion loss of 3 dB can be noticed. At 5.5 it increases to 7 dB. Insertion loss can be approximated by:

$$L_{glass}(\text{dB}) \approx 3 + 1.2(f_{\text{GHz}} - 2.4)$$

Let us now present the results for the vertical polarization. At 2.4 GHz, an insertion loss of 3 dB can be noticed. At 5.5 it increases to 7 dB. Here also, the insertion loss can be approximated by the same equation given before for the horizontal polarization.

Measurements at others points in different places shows that average value of the insertion loss is almost the same as shown in Fig. 8 with a very low standard deviation of 0.25 dB at 5.5 GHz.

6. HUMAN BEINGS EFFECT

Thirty six persons have been used to get the results. Here we will present the results of three different cases.

Firstly we will study the effect of the presence of one person between the transmitting and receiving antennas. Here 30 different persons have been used in the measurements. Fig. 9 shows the insertion loss for the three bands. An insertion loss of 10 dB has been recorded in the 2.4 GHz band increasing to 18 dB at the 5.5 GHz band. The standard deviation of the loss is a function of frequency. It increases with the increment of the operating frequency.

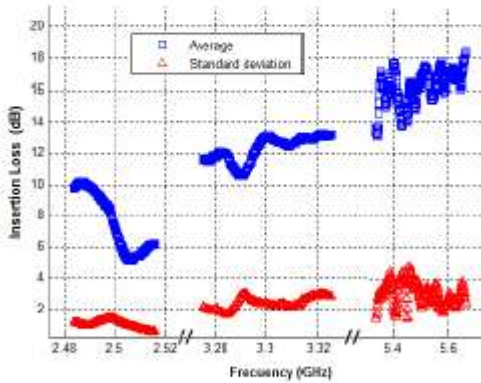


Figure 9. One person insertion loss.

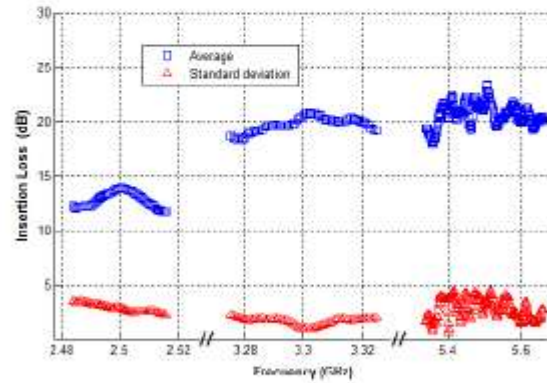


Figure 10. Three person side to side insertion loss.

Secondly we will study the effect of the presence of three persons side to side between the transmitting and receiving antennas. Fig. 10 shows the insertion loss for the three bands. An insertion loss of 14 dB has been recorded in the 2.4 GHz band increasing to 23 dB at the 5.5 GHz band. This indicates that the diffraction from the side parts of

the persons in the previous case is now lower. The standard deviation of the loss has its maximum value at the 5.5 GHz band.

Finally we will study the effect of the presence of two persons between the transmitting and receiving antennas. Fig. 11 shows the insertion loss for the three bands. An insertion loss of 12 dB has been recorded in the 2.4 GHz band increasing to 18.2 dB at the 5.5 GHz band. Here also, the standard deviation of the loss has its maximum value at the 5.5 GHz band.

Other works, such as [6, 7], report an insertion loss up to 30 dB per person but in different environment.

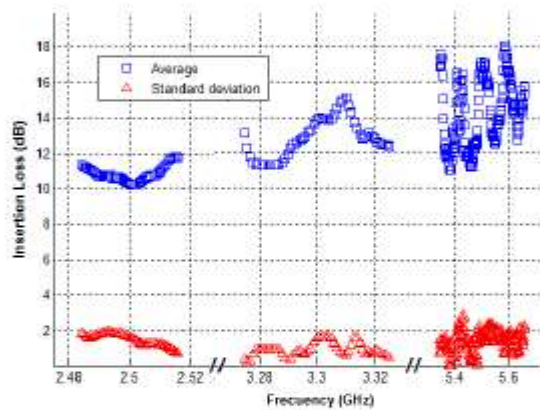


Figure 11. Two person insertion loss.



Figure 12. Picture of studied tree.

7. PROPAGATION THROUGH TREE'S FOLIAGE

Figure 12 represents the picture of an individual tree of the type (*Melia Azedarach*). Figs. 13 and 14 represent the measurements points and the direction where the antennas appoint Five directions namely 0° , $+10^\circ$, $+20^\circ$, -10° and -20° have been used to get the results. Let us present the foliage loss at points C and D.

Figure 15 represents the foliage insertion loss at 2.4 GHz. At point D and 0 degree, an insertion loss of 10.2 dB can be noticed at 0° Higher loss can be noticed at other measurement angles. Lower insertion loss can be noticed at point C.

Figure 16 represents the foliage insertion loss at 3.3 GHz. At point D and 0 degree, an insertion loss of 11.7 dB can be noticed at 0° . Higher

8

Ahmed, Calvo, and Masa Campos

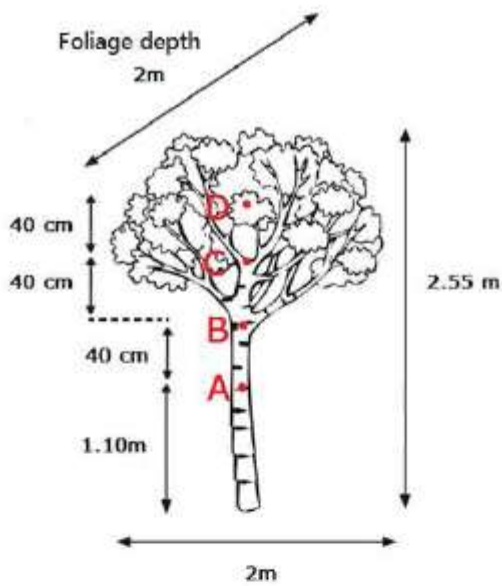


Figure 13. The studied tree measurements points.

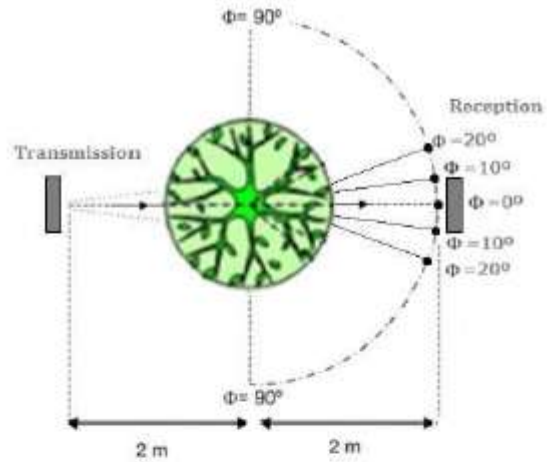


Figure 14. The studied tree measurements directions.

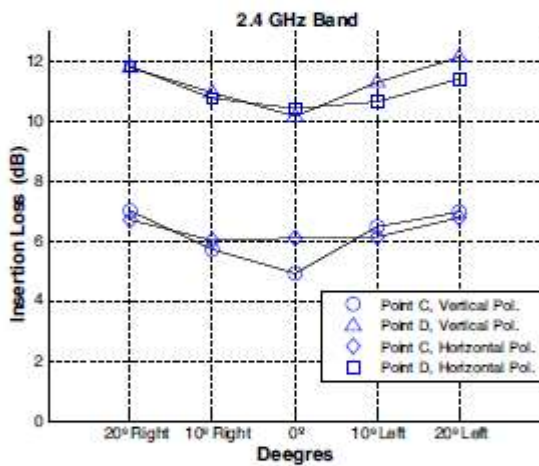


Figure 15. Tree's insertion loss at 2.4 GHz band.

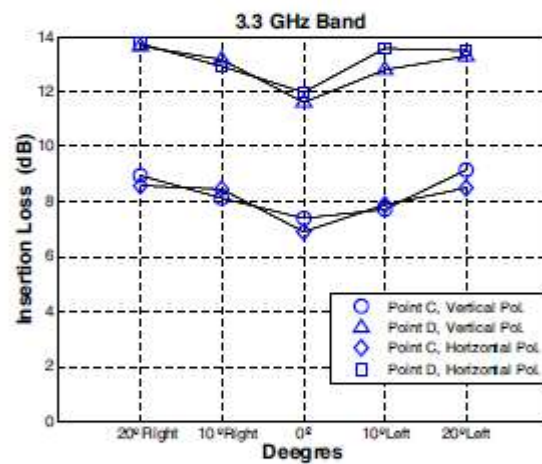


Figure 16. Tree's insertion loss at 3.3 GHz band.

loss can be noticed at other measurement angles. Lower insertion loss can be noticed at point C.

Figure 17 represents the foliage insertion loss at 5.5 GHz. At point D and 0 degree, an insertion loss of 13.2 dB can be noticed at 0°. Higher loss can be noticed at other measurement angles. Lower insertion loss can be noticed at point C.

A logical increment of the insertion loss with the increment of the operating frequency can be noticed comparing the results given by Figures 15, 16 and 17.

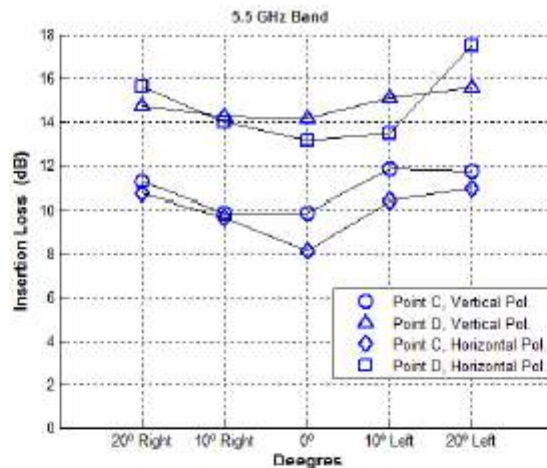


Figure 17. Tree's insertion loss at 5.5 GHz band.

Insertion loss can be approximated by:

$$L_{\text{dB}} \approx -0.318f_{\text{GHz}}^2 + 3.477f_{\text{GHz}} + 3.683$$

where f_{GHz} is the operating frequency in GHz.

8. CONCLUSIONS

The insertion loss of different materials has been measured at 2.4, 3.3 and 5.5 GHz bands. Metallic door with porthole window, metallic grid, glass window, human beings and tree's insertion loss have been measured. The metallic grid has presented a band pass filter function with a resonance frequency between 3.2 to 3.3 GHz. Other materials have an insertion loss that increases with the increment of the operating frequency.

REFERENCES

1. Roozbahani, M. G., E. Jedari, and A. A. Shishegar, "A new link-level simulation procedure of wideband MIMO radio channel for performance evaluation of indoor WLANS," *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 83, 13–24, 2008.
2. Tayebi, J. G., F. Saez de Adana, and O. Gutierrez, "The application of ray-tracing to mobile localization using the direction of arrival and received signal strength in multipath indoor environments," *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 91, 1–15, 2009.
3. Bertoni, H. L., *Radio Propagation for Modern Wireless Systems*, Prentice Hall PTR, New Jersey, 2000.

4. Rappaport, T. S., *Wireless Communications*, Prentice Hall PTR, New York, 1996.
5. Saunders, S. R., *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*, J. Wiley & Sons, New York, 1999.
6. Kara, A., “Human body shadowing variability in short-range indoor radio links at 3–11 GHz band,” *International Journal of Electronics*, Vol. 96, No. 2, 205–211, February 2009.
7. Kara, A. and H. L. Bertoni, “Effect of people moving near short-range indoor propagation links at 2.45 GHz,” *Journal of Communications and Networks*, Vol. 8, No. 3, 286–289, September 2006.
8. Taha Ahmed, B., D. F. Campillo, and J. L. Masa Campos, “Short range propagation model for a very wideband directive channel at 5.5 GHz band,” *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 130, 319–346, 2012.
9. Choi, J., N.-G. Kang, J.-M. Ra, J.-S. Kang, and S.-C. Kim, “Effect of metal door on indoor radio channel,” *The 18th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC’07)*, 1–5, 2007.
10. Chee, K. L., A. Anggraini, T. Kaiser, and T. Kürner, “Outdoor-to-indoor propagation loss measurements for broadband wireless access in rural areas,” *Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, 1376–1380, 2011.
11. Nagy, L., “FDTD and ray optical methods for indoor wave propagation modeling,” *Microwave Review*, 47–53, July 2010.

APÉNDICE C: PRESUPUESTO

▪ **Presupuesto**

1) Ejecución Material

- Compra de ordenador personal (Software incluido).....1000 €
- Alquiler de equipos de medida (4 meses).....4000 €
- Compra de antenas.....300 €
- Compra de trípodes y otros equipos necesarios.....100 €
- Compra de impresora láser + toners.....200 €
- Material de oficina.....100 €
- Total de ejecución material.....5700 €

2) Gastos generales

- 16 % sobre Ejecución Material912 €

3) Beneficio Industrial

- 6 % sobre Ejecución Material342 €

4) Honorarios Proyecto

- 800 horas a 15 € / hora12000 €

5) Material fungible

- Gastos de impresión200 €
- Encuadernación15 €

6) Subtotal del presupuesto

- Subtotal Presupuesto19169 €

7) I.V.A. aplicable

- 21% Subtotal Presupuesto4025,49 €

8) Total presupuesto

- Total Presupuesto**23194,49 €**

Madrid, Abril 2013
El Ingeniero Jefe de Proyecto
Fdo. Ignacio Álvarez Calvo
Ingeniero Superior de Telecomunicación

APÉNDICE D: PLIEGO DE CONDICIONES

Este documento contiene las condiciones legales que guiarán la realización, en este proyecto, **“Pérdidas de inserción en diferentes tipos de materiales y árboles”**. En lo que sigue, se supondrá que el proyecto ha sido encargado por una empresa cliente a una empresa consultora con la finalidad de realizar dicho sistema. Dicha empresa ha debido desarrollar una línea de investigación con objeto de elaborar el proyecto. Esta línea de investigación, junto con el posterior desarrollo de los programas está amparada por las condiciones particulares del siguiente pliego.

Supuesto que la utilización industrial de los métodos recogidos en el presente proyecto ha sido decidida por parte de la empresa cliente o de otras, la obra a realizar se regulará por las siguientes:

Condiciones generales

1. La modalidad de contratación será el concurso. La adjudicación se hará, por tanto, a la proposición más favorable sin atender exclusivamente al valor económico, dependiendo de las mayores garantías ofrecidas. La empresa que somete el proyecto a concurso se reserva el derecho a declararlo desierto.
2. El montaje y mecanización completa de los equipos que intervengan será realizado totalmente por la empresa licitadora.
3. En la oferta, se hará constar el precio total por el que se compromete a realizar la obra y el tanto por ciento de baja que supone este precio en relación con un importe límite si este se hubiera fijado.
4. La obra se realizará bajo la dirección técnica de un Ingeniero Superior de Telecomunicación, auxiliado por el número de Ingenieros Técnicos y Programadores que se estime preciso para el desarrollo de la misma.
5. Aparte del Ingeniero Director, el contratista tendrá derecho a contratar al resto del personal, pudiendo ceder esta prerrogativa a favor del Ingeniero Director, quien no estará obligado a aceptarla.
6. El contratista tiene derecho a sacar copias a su costa de los planos, pliego de condiciones y presupuestos. El Ingeniero autor del proyecto autorizará con su firma las copias solicitadas por el contratista después de confrontarlas.
7. Se abonará al contratista la obra que realmente ejecute con sujeción al proyecto que sirvió de base para la contratación, a las modificaciones autorizadas por la superioridad o a las órdenes que con arreglo a sus facultades le hayan comunicado por escrito al Ingeniero Director de obras siempre que dicha obra se haya ajustado a los preceptos de los pliegos de condiciones, con arreglo a los cuales, se harán las modificaciones y la valoración de las diversas unidades sin que el importe total pueda exceder de los presupuestos aprobados. Por consiguiente, el número de unidades que se consignan en el proyecto o en el presupuesto, no podrá servirle de fundamento para entablar reclamaciones de ninguna clase, salvo en los casos de rescisión.¹³⁸.
8. Tanto en las certificaciones de obras como en la liquidación final, se abonarán los trabajos realizados por el contratista a los precios de ejecución material que figuran en el presupuesto para cada unidad de la obra.

9. Si excepcionalmente se hubiera ejecutado algún trabajo que no se ajustase a las condiciones de la contrata pero que sin embargo es admisible a juicio del Ingeniero Director de obras, se dará conocimiento a la Dirección, proponiendo a la vez la rebaja de precios que el Ingeniero estime justa y si la Dirección resolviera aceptar la obra, quedará el contratista obligado a conformarse con la rebaja acordada.
10. Cuando se juzgue necesario emplear materiales o ejecutar obras que no figuren en el presupuesto de la contrata, se evaluará su importe a los precios asignados a otras obras o materiales análogos si los hubiere y cuando no, se discutirán entre el Ingeniero Director y el contratista, sometiéndolos a la aprobación de la Dirección. Los nuevos precios convenidos por uno u otro procedimiento, se sujetarán siempre al establecido en el punto anterior.
11. Cuando el contratista, con autorización del Ingeniero Director de obras, emplee materiales de calidad más elevada o de mayores dimensiones de lo estipulado en el proyecto, o sustituya una clase de fabricación por otra que tenga asignado mayor precio o ejecute con mayores dimensiones cualquier otra parte de las obras, o en general, introduzca en ellas cualquier modificación que sea beneficiosa a juicio del Ingeniero Director de obras, no tendrá derecho sin embargo, sino a lo que le correspondería si hubiera realizado la obra con estricta sujeción a lo proyectado y contratado.
12. Las cantidades calculadas para obras accesorias, aunque figuren por partidaalzada en el presupuesto final (general), no serán abonadas sino a los precios de la contrata, según las condiciones de la misma y los proyectos particulares que para ellas se formen, o en su defecto, por lo que resulte de su medición final.
13. El contratista queda obligado a abonar al Ingeniero autor del proyecto y director de obras así como a los Ingenieros Técnicos, el importe de sus respectivos honorarios facultativos por formación del proyecto, dirección técnica y administración en su caso, con arreglo a las tarifas y honorarios vigentes.
14. Concluida la ejecución de la obra, será reconocida por el Ingeniero Director que a tal efecto designe la empresa.
15. La garantía definitiva será del 4% del presupuesto y la provisional del 2%.
16. La forma de pago será por certificaciones mensuales de la obra ejecutada, de acuerdo con los precios del presupuesto, deducida la baja si la hubiera.
17. La fecha de comienzo de las obras será a partir de los 15 días naturales del replanteo oficial de las mismas y la definitiva, al año de haber ejecutado la provisional, procediéndose si no existe reclamación alguna, a la reclamación de la fianza.
18. Si el contratista al efectuar el replanteo, observase algún error en el proyecto, deberá comunicarlo en el plazo de quince días al Ingeniero Director de obras, pues transcurrido ese plazo será responsable de la exactitud del proyecto.139.
19. El contratista está obligado a designar una persona responsable que se entenderá con el Ingeniero Director de obras, o con el delegado que éste designe, para todo relacionado con ella. Al ser el Ingeniero Director de obras el que interpreta el proyecto, el contratista deberá consultarle cualquier duda que surja en su realización.

20. Durante la realización de la obra, se girarán visitas de inspección por personal facultativo de la empresa cliente, para hacer las comprobaciones que se crean oportunas. Es obligación del contratista, la conservación de la obra ya ejecutada hasta la recepción de la misma, por lo que el deterioro parcial o total de ella, aunque sea por agentes atmosféricos u otras causas, deberá ser reparado o reconstruido por su cuenta.

21. El contratista, deberá realizar la obra en el plazo mencionado a partir de la fecha del contrato, incurriendo en multa, por retraso de la ejecución siempre que éste no sea debido a causas de fuerza mayor. A la terminación de la obra, se hará una recepción provisional previo reconocimiento y examen por la dirección técnica, el depositario de efectos, el interventor y el jefe de servicio o un representante, estampando su conformidad el contratista.

22. Hecha la recepción provisional, se certificará al contratista el resto de la obra, reservándose la administración el importe de los gastos de conservación de la misma hasta su recepción definitiva y la fianza durante el tiempo señalado como plazo de garantía. La recepción definitiva se hará en las mismas condiciones que la provisional, extendiéndose el acta correspondiente. El Director Técnico propondrá a la Junta Económica la devolución de la fianza al contratista de acuerdo con las condiciones económicas legales establecidas.

23. Las tarifas para la determinación de honorarios, reguladas por orden de la Presidencia del Gobierno el 19 de Octubre de 1961, se aplicarán sobre el denominado en la actualidad “Presupuesto de Ejecución de Contrata” y anteriormente llamado “Presupuesto de Ejecución Material” que hoy designa otro concepto.

Condiciones particulares

La empresa consultora, que ha desarrollado el presente proyecto, lo entregará a la empresa cliente bajo las condiciones generales ya formuladas, debiendo añadirse las siguientes condiciones particulares:

1. La propiedad intelectual de los procesos descritos y analizados en el presente trabajo, pertenece por entero a la empresa consultora representada por el Ingeniero Director del Proyecto.
2. La empresa consultora se reserva el derecho a la utilización total o parcial de los resultados de la investigación realizada para desarrollar el siguiente proyecto, bien para su publicación o bien para su uso en trabajos o proyectos posteriores, para la misma empresa cliente o para otra.
3. Cualquier tipo de reproducción aparte de las reseñadas en las condiciones generales, bien sea para uso particular de la empresa cliente, o para cualquier otra aplicación, contará con autorización expresa y por escrito del Ingeniero Director del Proyecto, que actuará en representación de la empresa consultora.140.
4. En la autorización se ha de hacer constar la aplicación a que se destinan sus reproducciones así como su cantidad.
5. En todas las reproducciones se indicará su procedencia, explicitando el nombre del proyecto, nombre del Ingeniero Director y de la empresa consultora.

6. Si el proyecto pasa la etapa de desarrollo, cualquier modificación que se realice sobre él, deberá ser notificada al Ingeniero Director del Proyecto y a criterio de éste, la empresa consultora decidirá aceptar o no la modificación propuesta.
7. Si la modificación se acepta, la empresa consultora se hará responsable al mismo nivel que el proyecto inicial del que resulta el añadirla.
8. Si la modificación no es aceptada, por el contrario, la empresa consultora declinará toda responsabilidad que se derive de la aplicación o influencia de la misma.
9. Si la empresa cliente decide desarrollar industrialmente uno o varios productos en los que resulte parcial o totalmente aplicable el estudio de este proyecto, deberá comunicarlo a la empresa consultora.
10. La empresa consultora no se responsabiliza de los efectos laterales que se puedan producir en el momento en que se utilice la herramienta objeto del presente proyecto para la realización de otras aplicaciones.
11. La empresa consultora tendrá prioridad respecto a otras en la elaboración de los proyectos auxiliares que fuese necesario desarrollar para dicha aplicación industrial, siempre que no haga explícita renuncia a este hecho. En este caso, deberá autorizar expresamente los proyectos presentados por otros.
12. El Ingeniero Director del presente proyecto, será el responsable de la dirección de la aplicación industrial siempre que la empresa consultora lo estime oportuno. En caso contrario, la persona designada deberá contar con la autorización del mismo, quien delegará en él las responsabilidades que ostente.