



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE  
TELECOMUNICACIÓN

Proyecto Final de Carrera

# Caracterización del canal radio en entornos especiales

Alumno:

Alejandro Fornés Leal

Tutor:

Narcís Cardona Marcet

Departamento de Comunicaciones, Universitat Politècnica de València

Directora:

Concepción García Pardo

Grupo de Comunicaciones Móviles, Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones  
Multimedia

# Agradecimientos

Quisiera dar las gracias en primer lugar a mis padres, José y Conchi, por su apoyo, su cariño y por haber creído siempre en mí. Sin ellos no habría sido posible llegar hasta aquí.

Quiero agradecer especialmente a Concepción García Pardo, directora del proyecto, su predisposición en ayudarme en todo lo posible y por todo lo que he aprendido gracias a ella a lo largo de estos últimos meses. También a mi tutor, Narcís Cardona, por haberme dado la oportunidad de realizar este proyecto. No quisiera pasar la oportunidad de agradecer la ayuda de otras personas que han hecho posible este proyecto, como son Fernando Prieto, Raúl Chávez y Ana Vallés.

Por último dar las gracias a mis amigos por estar siempre a mi lado, tanto de Denia como de la universidad, ya que sin ellos la vida no sería lo mismo.

# Índice

<b>Agradecimientos</b> .....	<b>II</b>
<b>Índice</b> .....	<b>III</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>VII</b>
<b>Capítulo 1: Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1. La banda de UWB .....	3
1.2. Objetivos del proyecto .....	5
<b>Capítulo 2: Caracterización del canal radio</b> .....	<b>7</b>
2.1. Parámetros característicos .....	9
2.1.1. Power Delay Profile.....	9
2.1.2. Pérdidas de propagación .....	10
2.1.3. Delay Spread .....	10
2.1.4. Ancho de banda de coherencia .....	11
2.2. Sistemas de medida del canal.....	11
2.2.1. Sistema de pulsos de RF directo .....	11
2.2.2. Sistema de Correlador deslizando de espectro expandido.....	12
2.2.3. Sistema de Medida de canal en el dominio de la frecuencia .....	12
<b>Capítulo 3: Metodología de Medidas</b> .....	<b>15</b>
3.1. Elementos Hardware del Sistema de Medida .....	15
3.1.1. Agilent E5072A ENA Series Network Analyzer .....	15
3.1.2. Cables Coaxiales y Conectores.....	16
3.1.3. Ordenador portátil SONY Vaio SVE17 y Cable USB tipo A-B .....	17
3.1.4. Antenas empleadas .....	17
3.2. Elementos Software del Sistema de Medida.....	19
3.2.1. Matlab con Instrument Control Toolbox .....	22
3.2.2. Agilent IO Libraries Suite 16.....	23
3.2.3. IVI Foundation shared drivers y drivers específicos para Agilent .....	24

3.3. Realización y Procesado de las medidas.....	24
3.3.1. Configuración del equipo.....	24
3.3.2. Calibración del sistema .....	25
3.3.3. Captura de las medidas .....	25
3.3.4. Procesado de las medidas .....	25
<b>Capítulo 4: Caracterización del canal radio en incendios.....</b>	<b>29</b>
4.1. Mecanismos de degradación.....	29
4.1.1. Efecto del plasma en incendios.....	30
4.2. Configuración del experimento .....	34
4.2.1. Elementos empleados y disposición de los mismos .....	35
4.2.2. Metodología de medida.....	37
4.2.3. Fases del incendio.....	38
4.3. Resultados .....	39
4.3.1. Temperatura .....	39
4.3.2. Pérdidas de propagación .....	40
4.3.3. Potencia de la contribución principal .....	44
4.3.4. Otros parámetros.....	46
<b>Capítulo 5: Caracterización del canal radio en BAN.....</b>	<b>49</b>
5.1. Phantom de simulación .....	51
5.2. Caso In-Body to In-Body .....	53
5.2.1. Disposición del experimento .....	53
5.2.2. UWB.....	54
5.2.2.1. Resultados.....	55
5.2.3. Banda ISM.....	59
5.2.3.1. Resultados.....	60
5.3. Caso In-Body to On-Body.....	63
5.3.1. Disposición del experimento .....	63
5.3.2. UWB.....	64
5.3.2.1. Resultados.....	65

## Caracterización del canal radio en entornos especiales

	<b>Índice</b>
5.3.3. Banda ISM.....	73
5.3.3.1. Resultados.....	74
5.4. Caso In-Body to Off-Body .....	77
5.4.1. Disposición del experimento .....	77
5.4.2. UWB.....	77
5.4.2.1. Resultados.....	78
5.4.3. Banda ISM.....	83
5.4.3.1. Resultados.....	83
<b>Capítulo 6: Conclusiones y líneas futuras de trabajo.....</b>	<b>87</b>
6.1. Conclusiones del análisis del canal radio en incendios.....	87
6.1.1. Líneas futuras de trabajo en incendios indoor .....	88
6.2. Conclusiones del análisis del canal radio en BAN .....	89
6.2.1. Líneas futuras de trabajo en BAN .....	90
<b>Capítulo 7: Referencias .....</b>	<b>93</b>
<b>Anexo I: Scripts de automatización de medidas.....</b>	<b>97</b>
<b>Anexo II: Scripts de procesamiento de datos de incendios.....</b>	<b>101</b>
<b>Anexo III: Scripts de procesamiento de datos de BAN.....</b>	<b>105</b>



# Lista de figuras

Figura 1. Incendio en entorno indoor .....	2
Figura 2. Comparación de UWB con sistemas de banda estrecha .....	4
Figura 3. Relación entre las funciones de canal .....	8
Figura 4. Esquema del sistema de pulsos de RF .....	11
Figura 5. Esquema del sistema de Correlador deslizante de espectro expandido .....	12
Figura 6. Esquema del sistema de Medida en el dominio de la frecuencia .....	13
Figura 7. Analizador de redes vectorial empleado .....	16
Figura 8. Antena parche empleada para la caracterización de canal en UWB.....	17
Figura 9. Antena implantable empleada para la caracterización de canal en UWB....	18
Figura 10. Antena hélice empleada para la caracterización de canal en UWB .....	18
Figura 11. Esquema del dipolo empleado para la caracterización de canal en ISM ...	19
Figura 12. Antena hélice empleada para la caracterización de canal en ISM .....	19
Figura 13. Interfaz gráfica para la configuración del VNA y la captura de medidas ...	20
Figura 14. Interfaz de la suite de Agilent .....	23
Figura 15. Interfaz de trabajo de MATLAB .....	26
Figura 16. Condiciones en las que se produce plasma.....	31
Figura 17. Potencia relativa recibida en la banda de 160-180MHz .....	32
Figura 18. Potencia relativa recibida en las bandas de 400-450MHz (izquierda) y 850-950MHz (derecha) .....	33
Figura 19. Esquema del contenedor en el que se realizó el ensayo .....	34
Figura 20. Colocación del combustible y de los termopares en el interior del contenedor .....	35
Figura 21. Antenas y cámara empleadas junto a los elementos protectores .....	36
Figura 22. Camión de bomberos en el que colocamos el VNA .....	36
Figura 23. Distribución de los elementos en el contenedor .....	37
Figura 24. Imágenes del incendio .....	38
Figura 25. Temperatura monitorizada por los termopares durante el incendio .....	39
Figura 26. Pérdidas de propagación en toda la banda de UWB a lo largo del experimento .....	40

Figura 27. Pérdidas de propagación para diferentes sub-bandas centradas en $f_c=5.75$ GHz .....	41
Figura 28. Pérdidas en sub-bandas con diferentes frecuencias centrales y $BW= 500$ MHz .....	42
Figura 29. Pérdidas en sub-bandas con diferentes frecuencias centrales y $BW=1$ GHz .....	42
Figura 30. Pérdidas en sub-bandas con diferentes frecuencias centrales y $BW=2$ GHz .....	43
Figura 31. Fase del incendio inicial, con LOS .....	44
Figura 32. Fase intermedia, con NLOS .....	45
Figura 33. PDP en condiciones LOS.....	45
Figura 34. PDP en condiciones NLOS .....	46
Figura 35. RMS Delay Spread del canal.....	47
Figura 36. Ancho de banda de coherencia del canal .....	47
Figura 37. Matraz del laboratorio empleado .....	52
Figura 38. Equipo de medida de permitividad relativa .....	52
Figura 39. Disposición del experimento de In-Body to In-Body .....	53
Figura 40. Esquema de mediciones para IB2IB en UWB .....	54
Figura 41. Respuesta en frecuencia de IB2IB en UWB .....	55
Figura 42. Pérdidas de propagación de IB2IB al aumentar el ancho de banda de trabajo en UWB .....	56
Figura 43. Pérdidas de propagación de IB2IB en bandas de UWB .....	57
Figura 44. Pérdidas de propagación de IB2IB de 3.1 a 4.8 GHz .....	58
Figura 45. Pérdidas de propagación de IB2IB de 3.1 a 4.8 GHz con modelo lineal .....	59
Figura 46. Respuesta en frecuencia de IB2IB en ISM.....	60
Figura 47. Pérdidas de propagación de IB2IB en sub-bandas de ISM .....	61
Figura 48. Pérdidas de propagación de IB2IB en ISM .....	61
Figura 49. Pérdidas de propagación de IB2IB en ISM con el modelo lineal .....	62
Figura 50. Disposición del experimento de In-Body to On-Body .....	63
Figura 51. Esquema de mediciones para IB2OB en UWB .....	64
Figura 52. Respuesta en frecuencia de IB2OB con antenas tipo parche en UWB .....	65
Figura 53. Pérdidas de propagación de IB2OB en bandas de UWB, caso antenas parche .....	66



Figura 54. Respuesta en frecuencia de IB2OB con antenas tipo parche de 3.1 a 4.8 GHz .....	67
Figura 55. Respuesta en frecuencia de IB2OB con antenas parche y hélice de 3.1 a 4.8 GHz .....	67
Figura 56. Respuesta en frecuencia de IB2OB con antenas implantable y hélice de 3.1 a 4.8 GHz .....	68
Figura 57. Pérdidas de propagación de IB2OB al aumentar el ancho de banda de trabajo en UWB .....	69
Figura 58. Pérdidas de propagación de IB2OB en bandas de UWB .....	70
Figura 59. Pérdidas de propagación de IB2OB de 3.1 a 4.8 GHz .....	71
Figura 60. Pérdidas de propagación de IB2OB de 3.1 a 4.8GHz con modelo de doble pendiente .....	73
Figura 61. Respuesta en frecuencia de IB2OB en ISM .....	74
Figura 62. Pérdidas de propagación de IB2OB en sub-bandas de ISM .....	75
Figura 63. Pérdidas de propagación de IB2OB en ISM .....	75
Figura 64. Pérdidas de propagación de IB2OB en ISM con modelo de doble pendiente .....	76
Figura 65. Esquema de mediciones para IB2OFF en UWB .....	77
Figura 66. Respuesta en frecuencia de IB2OFF en UWB, antena interior a 10mm .....	78
Figura 67. Respuesta en frecuencia de IB2OFF en UWB, diferentes distancias de antena interior .....	79
Figura 68. Pérdidas de propagación de IB2OFF al aumentar el ancho de banda en UWB .....	80
Figura 69. Pérdidas de propagación de IB2OFF en bandas de UWB, antena interior a 20mm .....	81
Figura 70. Pérdidas de propagación de IB2OFF de 3.1 a 4.8 GHz con modelo logarítmico (eje de abscisas en lineal) .....	82
Figura 71. Pérdidas de propagación de IB2OFF de 3.1 a 4.8 GHz con modelo logarítmico(eje de abscisas en unidades logarítmicas) .....	82
Figura 72. Esquema de mediciones para IB2OFF en ISM .....	83
Figura 73. Pérdidas de propagación de IB2OFF al aumentar el ancho de banda trabajo en ISM .....	84
Figura 74. Pérdidas de propagación de IB2OFF en ISM con modelo logarítmico (eje de abscisas en lineal) .....	85

<b>Figura 75. Pérdidas de propagación de IB2OFF en ISM con modelo logarítmico (eje de abscisas en unidades logarítmicas).....</b>	<b>86</b>
<b>Figura 76. Posibles soluciones en el campo de la asistencia médica .....</b>	<b>91</b>

# Capítulo 1:

## Introducción

Las redes inalámbricas de área personal WPAN por sus siglas en inglés *Wireless Personal Area Network* son redes que comúnmente cubren distancias alrededor de los 10 metros como máximo, normalmente para conectar varios dispositivos portátiles personales sin la necesidad de utilizar cables [1]. Por motivo de sus interesantes características, como son su eficiencia y su bajo coste, este tipo de redes se ha ido desarrollando de forma exhaustiva a lo largo de la última década. Dentro del estándar IEEE 802.15 se han definido 4 clases de redes WPAN, con los siguientes grupos de trabajo: El grupo IEEE 802.15.1 adoptó el Bluetooth como base del estándar y continúa su evolución, el grupo 802.15.2 define modelos de coexistencia de WPAN con WLAN, el grupo 802.15.3 desarrolla un estándar de WPAN de alta velocidad que implique servicios multimedia, mientras que el 802.15.4 trata con sistemas de baja velocidad, complejidad y coste.

Debido a la necesidad de crear nuevas aplicaciones en tiempo real, tanto en el ámbito de la comunicación durante incendios como en el campo de redes de área corporal con dispositivos implantables, se intentará observar en una primera aproximación si el desarrollo de nuevos sistemas WPAN dedicados a ellos es factible.

En el ámbito de la lucha contra los incendios, los cuerpos de bomberos se exponen a un elevado riesgo y tienen que hacer frente a situaciones críticas que se producen durante la extinción de un incendio, especialmente si dicho incendio se produce en un entorno indoor como podemos observar en la figura 1. En aras de mejorar todo lo posible su seguridad en estas circunstancias, existe una demanda creciente de aplicaciones tanto para controlar la posición individual de cada bombero como para obtener información de la forma más rápida y clara de lo que está sucediendo.



**Fig.1 Incendio en entorno indoor**

Una aplicación que se está comenzando a estudiar es la posibilidad de enviar vídeo en tiempo real. Sin embargo, las bandas de frecuencia actuales que emplean las dotaciones de bomberos en sus comunicaciones están bastante por debajo del gigahercio, por lo que tanto el ancho de banda disponible y por ende su capacidad de transmisión están bastante limitados.

Por otra parte, las redes de área corporal (BAN, por sus siglas en inglés), son un subconjunto de las redes WPAN, y consisten en sistemas de comunicaciones a pequeña escala cuyas transmisiones se realizan dentro, alrededor o sobre el cuerpo humano [2]. La cobertura no es superior a los tres metros (para los mejores casos), y las emisiones de energía de este tipo de tecnologías son muy bajas, lo que contribuye a aumentar la vida de las baterías, a reducir interferencias con otras tecnologías, y a operar con potencias no nocivas para el ser humano.

Las comunicaciones de área corporal se dividen en dos áreas de acuerdo con la característica del medio de propagación [3], la primera clasificación recibe el nombre de comunicaciones intracorporales. En ellas, las transmisiones se realizan a través del tejido humano, por lo que se debe atravesar músculo, piel y algunos otros medios de transmisión en condiciones especiales. Es evidente que los dispositivos que soportan este tipo de aplicaciones son invasivos. En segunda instancia están las redes de área corporal no invasivas o superficiales, donde todas las transmisiones se realizan sobre la superficie del cuerpo humano, ya sea sobre la piel o ropa empleada.

Las principales aplicaciones de las redes de área corporal se encuentran en medicina e intercambio de información. Las aplicaciones médicas, que son del tipo intracorporal, se centran en la monitorización de constantes del cuerpo, la gestión y control de tratamientos, asistencia en cirugías y el diagnóstico de enfermedades. Las de intercambio de información se basan en transferencia de datos, audio y/o vídeo, englobando distintos dispositivos, así como en aplicaciones de automatización en el ámbito industrial o doméstico.

En la actualidad se emplea la banda MICS (Medical Implant Communication Service) para recibir la información desde los sensores o implantes médicos, banda que ocupa el espectro entre 402 y 405MHz [4]. Esta banda tiene como aspecto positivo su alcance

frente a bandas superiores, mientras que como aspecto negativo tiene una tasa relativamente baja al tener un ancho de banda de apenas 300kHz. Para crear sistemas más sofisticados, modernos y efectivos será necesario transmitir con mayor ancho de banda.

### 1.1. La banda de UWB

UWB se define como cualquier transmisión radio que ocupe un ancho de banda mayor al 20/25% de la frecuencia central y/o superior a 500MHz [5], definición que si bien no es muy representativa a primera vista es útil para distinguirlo de los sistemas tradicionales de banda estrecha y de los sistemas celulares de banda ancha.

Esta banda tiene una regulación diferente según cada organismo. En los Estados Unidos, la FCC (Federal Communication Commission) ubica la banda entre 3.1 y 10.6 GHz para interiores, tanto para indoor como para sistemas médicos, estableciendo una PIRE (Potencia Isotrópica Radiada Efectiva) máxima de -41.3 dBm/MHz [6]. En Europa, la CEPT (European Conference of Postal and Telecommunication Administrations) es más restrictiva y, para casos genéricos, define la banda de 3.1 a 4.8 GHz y de 6 a 9 GHz como UWB, con la misma PIRE máxima que establece la FCC.

Las transmisiones en UWB se basan en la transmisión de una serie de pulsos de relativamente baja energía modulados con tiempos extremadamente cortos (entre algunas decenas de picosegundos y pocos nanosegundos), en lugar de señales sinusoidales [7]. Los sistemas tradicionales emplean portadoras de RF para desplazar la señal en el dominio frecuencial desde la banda base hasta la frecuencia donde tiene licencia para operar, mientras que en UWB la información modula directamente los impulsos, siendo la modulación PPM la más empleada (PPM es a grandes rasgos una forma de modulación temporal en la que cada símbolo de información modula la posición en tiempo de un pulso). Esta transmisión por pulsos muy cortos en el tiempo se traduce en un espectro de gran ancho de banda en el dominio de la frecuencia.

Gracias al hecho de poseer este gran ancho de banda y a emplear señales de baja potencia, los sistemas UWB presentan unas características muy atractivas como son una alta capacidad, un gran número de usuarios simultáneos si trabajamos con sub-bandas y una muy buena resolución temporal como comentamos anteriormente, además de la capacidad de crear sistemas resistentes al multicamino y a las interferencias destructivas.

Una característica diferencial frente a las tecnologías anteriores es que la señal de UWB está diseñada para ocupar zonas del espectro asignadas a otros servicios sin causar interferencias significativas. Esto es posible gracias a la baja potencia con la que se transmite combinado con el gran ancho de banda al que se reparte dicha potencia.

Los niveles de señal resultantes son comparables a los niveles de ruido que soportan los receptores de otros sistemas. Los diferentes organismos, como ya hemos comentado, han establecido ciertos límites de emisión para los sistemas de UWB para que sean compatibles con los ya existentes, como vemos en la figura 2.

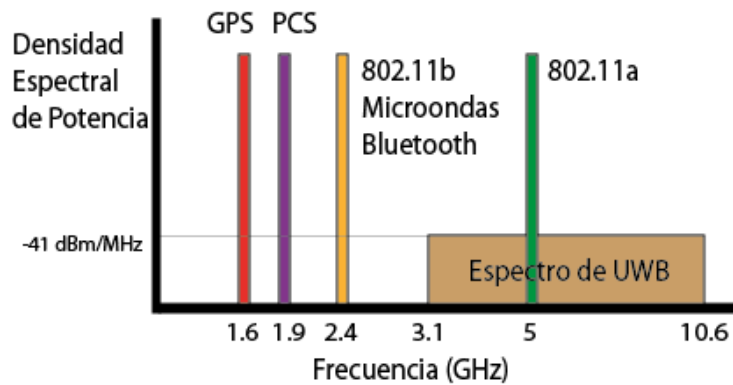


Fig.2 Comparación de UWB con otros sistemas de banda estrecha

El primer sistema de Ultra-Wideband del que se tiene constancia data de 1896, y fue creado por Guillermo Marconi [8]. Tras esta primera transmisión vía radio, en la que se emplearon señales de banda muy grande pero sin una explotación eficiente, el desarrollo de estudios sobre esta banda se enfrió.

Si bien hubo algunos avances a finales del siglo XIX y a principios del siglo XX como son la creación por parte de Sir Oliver Lodge de la antena bicónica, o alguna moderada evolución de la tecnología como los dispositivos más eficientes de Lee De Forest en 1906 [9], no fue hasta después de la segunda guerra mundial ya sobre los años 60 que el desarrollo de aplicaciones en esta banda empezó a crecer, gracias sobre todo a empresas relacionadas con instituciones militares y gubernamentales americanas [10].

Las aplicaciones en las que la banda de UWB tiene cabida son muchas. Ya en los años 90 varias empresas vieron potencial en la banda en el ámbito comercial de las redes de área personal y local [11]. En el campo militar, es una banda útil para la vigilancia de espacios como el suelo, el subsuelo y los bosques debido a la alta precisión que se consigue al medir distancias y al capturar imágenes de alta resolución de objetos escondidos bajo tierra o detrás de superficies [11], aplicaciones extensibles a servicios de construcción, sanidad, vigilancia...

Por sus características, esta banda crea unas expectativas muy grandes en el campo de desarrollo de dispositivos móviles a bajo coste de bajo consumo, corto alcance y gran ancho de banda. Aún así, la transmisión en UWB conlleva varios retos tecnológicos a mejorar o superar: estudiar nuevos esquemas de modulación para explotar la banda, sincronizar pulsos que son extremadamente cortos y desarrollar hardware para pulsos de duración de nanosegundos, entre otros [12].

## **1.2. Objetivos del proyecto**

El objetivo principal de este proyecto es caracterizar en profundidad dos casos particulares de redes de área personal. El primer caso a analizar es el canal radio UWB en el ámbito de la comunicación durante incendios, mientras que el segundo es el estudio del canal UWB, así como parte del espectro de ISM (Industrial, Scientific and Medical), en redes de área corporal.

Uno de los objetivos es crear una aplicación para controlar el equipo de medida y facilitar el proceso. Se medirá el parámetro de transmisión en diversos experimentos con la ayuda de un analizador de redes vectorial para obtener y analizar las pérdidas de propagación que introduce el canal con el propósito de conocer, en una primera aproximación, si la implantación de nuevos sistemas WPAN que permitan tasas de transmisión superiores es factible.

En el estudio del canal UWB durante la transmisión en el escenario de un incendio indoor la gama de frecuencias que vamos a analizar está por encima de los 3 GHz, frecuencias en las que las pérdidas de propagación en espacio libre serán de por sí elevadas, por lo que habrá que comprobar que la transmisión en esta zona del espectro no se ve especialmente afectada por las altas temperaturas, la presencia de humos o por otros factores, como puede ser el plasma debido a las llamas.

En cuanto a la transmisión en redes de área corporal (de tipo intracorporal), al no poder implantar antenas en el interior de un ser humano, se ha optado por emplear una solución acuosa que simule las características electromagnéticas de un tejido humano. En esta parte del proyecto analizaremos no sólo la banda de UWB, si no también dos bandas del espectro de ISM, que son bandas de frecuencia reservadas internacionalmente para uso no comercial de radiofrecuencia en áreas industrial, científica y médica. Estudiaremos una banda de reciente asignación como es la banda de 2.36 a 2.4 GHz y otra de 2.4 a 2.5 GHz [13]. Se analizarán tres casos de redes BAN intracorporales: la comunicación In-Body to In-Body, en el que ambos transmisores están en el interior del cuerpo, la In-Body to On-Body, en el que un transmisor es interno y el otro está sobre la persona, y por último la comunicación In-Body to Off-Body, con un transmisor interno y otro externo a cierta distancia del cuerpo.

Si la transmisión UWB en el ámbito de la lucha contra los incendios es factible, sería posible crear nuevas aplicaciones para mejorar tanto la seguridad como el flujo de información en tiempo real. En cuanto a las redes BAN, si la propagación por el canal en las bandas analizadas lo permite, se podrían implantar antenas más pequeñas, con consumos de potencia también inferiores, y crear aplicaciones más sofisticadas.

Este documento se estructura de la siguiente manera: en el capítulo 2 se hace un repaso de la teoría del canal radio, definiendo los parámetros que nos serán de ayuda para caracterizar el canal en los dos casos que vamos a estudiar, y también se exponen algunos tipos de sistemas de medida de canal (uno de ellos será el sistema en el que nos basemos). En el capítulo 3 se expone la metodología y el procesado de las medidas, y además se enumeran y explican los elementos que intervienen en el proceso, entre ellos la interfaz creada para facilitar las medidas.

En el capítulo 4 se exponen los resultados obtenidos referentes al caso del incendio indoor, explicando previamente el procedimiento seguido, algunos elementos particulares que intervienen y los mecanismos de degradación que tratamos de cuantificar. En el capítulo 5 explicamos cómo se creó el medio sintético en el que medimos y qué características tiene, definiremos los diferentes escenarios a estudiar (In-Body to In-Body, In-Body to On-Body e In-Body to Off-Body) y expondremos los resultados tanto para UWB como para la banda ISM.

En el capítulo 6 presentamos las conclusiones obtenidas para los dos ámbitos y exponemos posibles líneas futuras de trabajo. En el capítulo 7 se enumeran las referencias en las que nos hemos apoyado, mientras que en los Anexos I, II y III se muestra parte del código creado para obtener los resultados tanto de incendios como de BAN y las subrutinas asociadas a la interfaz de automatización de las medidas.



# Capítulo 2:

## Caracterización del canal radio

El entorno en el que se produce la comunicación mediante señales electromagnéticas actúa de manera fundamental sobre la comunicación, siendo el elemento más importante en los sistemas de transmisión vía radio. El canal radio se comporta como un filtro selectivo en frecuencia, y es de suma importancia conocer cómo va a afectar a las comunicaciones de una determinada banda de frecuencias para saber si un sistema puede o no ser implantado en dicho entorno.

Podemos considerar que el canal radio actúa como un sistema que transforma señales a la entrada en señales de salida como un filtro lineal variante en el tiempo. Se puede describir el comportamiento del canal tanto en el dominio de la frecuencia como en el del tiempo, empleando las ecuaciones de Bello [14].

**Función en el dominio temporal.** Como en cualquier sistema lineal, la descripción del canal de propagación se realiza mediante su respuesta al impulso. Como el canal puede ser variante en el tiempo, la respuesta al impulso también lo será. Esta  $h(t, \tau)$  es función de una serie de réplicas atenuadas, retardadas y desplazadas en fase de las señales transmitidas, como podemos ver en la ecuación (1).

$$h(t, \tau) = \sum_{i=0}^{N-1} a_i(t, \tau) \exp [j(2\pi f_c \tau_i(t) + \varphi_i(t, \tau))] \delta(\tau - \tau_i) \quad (1)$$

**Función en el dominio frecuencial.** La función  $H(f, v)$ , denominada función de ensanchamiento Doppler-Spread a la salida, determina el espectro del canal a la salida en función del espectro a la entrada.

**Función de transferencia variable con el tiempo.** La función del canal  $T(f, \tau)$  relaciona la señal temporal a la salida con el espectro de la señal a la entrada.

**Función de transferencia Doppler/retardo.** La función  $S(\tau, v)$  representa de forma conjunta tanto el ensanchamiento temporal (de retardo) como el frecuencial, también llamado Doppler.

Estas cuatro funciones bidimensionales sirven para caracterizar canales tanto deterministas como aleatorios. Pueden relacionarse vía transformada directa o inversa de Fourier, como podemos ver en la figura 3.

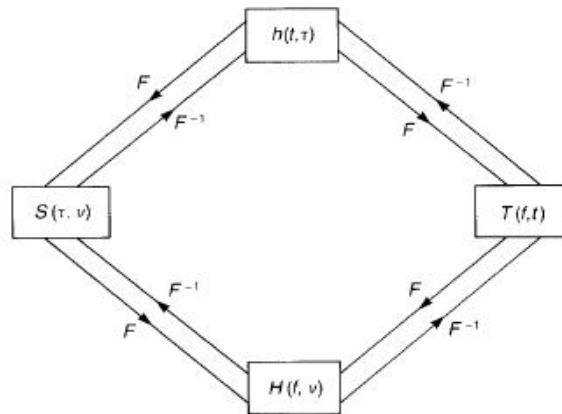


Fig.3 Relación entre las funciones de canal [15]

En los canales reales, las características varían de forma aleatoria, por lo que las funciones explicadas anteriormente se convierten en procesos estocásticos. La aproximación más simple para analizar estas funciones se basa en obtener las funciones de correlación que presentamos a continuación [15]:

$$E[h(t, \tau)h^*(s, \eta)] = R_h(t, s; \tau, \eta) \quad (2)$$

$$E[H(f, v)H^*(m, \mu)] = R_H(f, m; v, \mu) \quad (3)$$

$$E[T(f, t)T^*(m, s)] = R_T(f, m; t, s) \quad (4)$$

$$E[S(\tau, v)S^*(\eta, \mu)] = R_S(\tau, \eta; v, \mu) \quad (5)$$

Donde  $t$  y  $s$  son variables de tiempo,  $\tau$  y  $\eta$  variables de retardo temporal,  $f$  y  $m$  variables frecuenciales,  $\nu$  y  $\mu$  variables de desplazamiento frecuencial. Se pueden relacionar las funciones de correlación del canal por medio de transformadas y antitransformadas dobles de Fourier.

En la práctica, las funciones anteriores se simplifican siguiendo una serie de consideraciones. Así, podemos clasificar los canales prácticos en los siguientes tres grupos:

**Canal estacionario en sentido amplio (WSS).** Estos canales tienen la propiedad de que la correlación del canal es invariante para una traslación en el tiempo, por lo que las estadísticas de desvanecimiento son estacionarias en tiempos cortos o en distancias pequeñas.

**El canal de "scattering" incorrelado (US).** En estos canales las contribuciones con distintos retardos están incorreladas.

**El canal de "scattering" incorrelado estacionario en sentido amplio (WSSUS).** Combina las propiedades de los canales WSS y USS y, afortunadamente, la mayoría de los canales reales pueden incluirse en este tipo. Asumiremos que los canales que vamos a analizar en este proyecto cumplen estas características.

### 2.1. Parámetros característicos

En este apartado vamos a describir los parámetros en los que nos vamos a apoyar para caracterizar el canal radio. Los parámetros que vamos a describir, que serán las pérdidas de propagación, el Power Delay Profile, el RMS delay spread y el ancho de banda de coherencia, se obtendrán a partir de la respuesta en frecuencia del canal.

#### 2.1.1. Power delay profile

El Power Delay Profile (PDP) nos da la intensidad de las contribuciones multicamino recibidas en un entorno en función del retardo temporal de cada una. Dicho retardo es diferente para cada componente debido a que recorren distancias diferentes, por diferentes caminos. Si bien se puede representar el PDP en función del retardo temporal (generalmente del orden de decenas de nanosegundos en entornos indoor), también es habitual representar el PDP en función de la distancia recorrida por cada contribución, relacionando los retardos con la velocidad de la luz en el medio.

Del PDP se puede obtener fácilmente la potencia recibida de la máxima contribución, que será generalmente la del rayo directo. La potencia máxima recibida permite analizar en un rango temporal fluctuaciones del rayo directo e identificar posibles cambios en las condiciones del canal.

### 2.1.2. Pérdidas de propagación

Las pérdidas de propagación son la reducción de densidad de potencia de una onda electromagnética que se produce mientras dicha onda se propaga [16]. Estas pérdidas son un aspecto crítico a la hora de analizar la viabilidad de un determinado enlace de un sistema de telecomunicaciones. Las pérdidas de propagación pueden deberse a multitud de efectos, como son las pérdidas en espacio libre, refracciones, difracciones, reflexiones y absorciones, entre otros. Evidentemente influye la distancia del enlace, así como la altura y colocación de las antenas y el entorno. Se puede deducir de la respuesta al impulso del canal como vemos en la ecuación (6).

$$PL = \frac{1}{\int_{\tau} |h(t, \tau)|^2 d\tau} \quad (6)$$

### 2.1.3. Delay spread

El Delay Spread es una medida para caracterizar las contribuciones multicamino en un canal de comunicaciones en el dominio temporal. En general, se interpreta como la diferencia entre la llegada de la primera contribución importante (típicamente la del rayo directo) y el tiempo de llegada del resto de componentes significativas.

El delay spread puede ser cuantificado mediante diferentes ecuaciones, siendo la más empleada la RMS (Root Mean Square) delay spread. Se obtiene a partir del cálculo previo del PDP y del exceso de retardo medio del canal, como podemos ver en las ecuaciones (7) y (8).

$$\bar{\tau} = \frac{\sum \tau \times PDP(\tau)}{\sum PDP(\tau)} \quad (7)$$

$$\tau_{rms} = \sqrt{\frac{\sum (\tau - \bar{\tau})^2 PDP(\tau)}{\sum PDP(\tau)}} \quad (8)$$

La importancia del RMS delay spread viene dada por cómo afecta la interferencia entre símbolos (IES/ISI). Si la duración de símbolo es suficientemente grande comparada con el delay spread (unas diez veces más sería suficiente) se puede esperar un canal sin ISI. En el dominio de la frecuencia hay una noción similar, que es el ancho de banda de coherencia, parámetro que veremos a continuación.

### 2.1.4. Ancho de banda de coherencia

El ancho de banda de coherencia es empleado para caracterizar el canal en el dominio de la frecuencia. Es una medida estadística del rango de frecuencias en la que el canal puede considerarse plano, esto es, que el canal afecta a las componentes frecuenciales con aproximadamente la misma atenuación y fase lineal. En otras palabras, es el rango de frecuencias en las que dos componentes frecuenciales tienen un gran potencial para correlarse en amplitud. El ancho de banda de coherencia puede calcularse a partir del RMS delay spread como vemos en la ecuación (9).

$$B_c = \frac{1}{5\tau_{rms}} \quad (9)$$

El ancho de banda de coherencia puede deducirse a partir del ancho de banda a -3dB de la autocorrelación de la función de la respuesta en frecuencia.

## 2.2. Sistemas de medida del canal

En esta sección explicaremos teóricamente algunos de los sistemas de medida de canal que se pueden emplear para caracterizarlo [14].

### 2.2.1. Sistema de pulsos de RF directo

Se transmite repetidamente un pulso de anchura  $T_b$ . En recepción se emplea un filtro paso banda ( $BW = 2/T_b$ ), un amplificador y un detector de envolvente. La señal recibida se observa en un osciloscopio tal y como vemos en la figura 4. Nos da una medida inmediata de la raíz de la respuesta al impulso convolucionada con el pulso de prueba. La mayor ventaja de este sistema es su simplicidad, mientras que su mayor inconveniente es que está sujeto a interferencias y a ruido debido al filtro paso banda. Además, el sistema debe estar sincronizado correctamente.

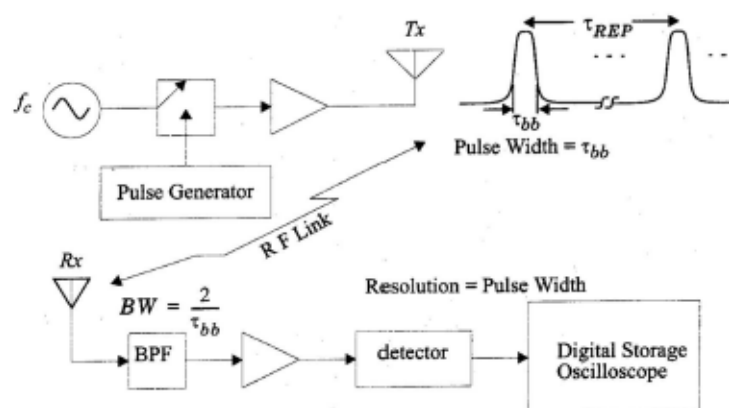


Fig.4 Esquema del sistema de pulsos de RF [14]

### 2.2.2. Sistema de Correlador deslizante de espectro expandido

En este sistema, una portadora es expandida en un gran ancho de banda y combinada con una secuencia binaria de pseudo-aleatoria (PA) de una duración de chip  $T_c$ . La señal de amplio espectro es recibida, filtrada y comprimida usando una secuencia generadora idéntica a la empleada en transmisión. Aunque las dos secuencias PA son idénticas, la frecuencia de reloj de chip del transmisor es ligeramente superior al del receptor. Cuando el código PA del reloj más rápido se sincroniza con el más lento, las dos secuencias estarán virtualmente alineadas, dando lugar a la máxima correlación. Entonces se detecta la envolvente de la señal y la respuesta al impulso aparece en la pantalla del osciloscopio convolucionada con la forma del pulso de chip. Podemos ver un esquema del sistema en la figura 5.

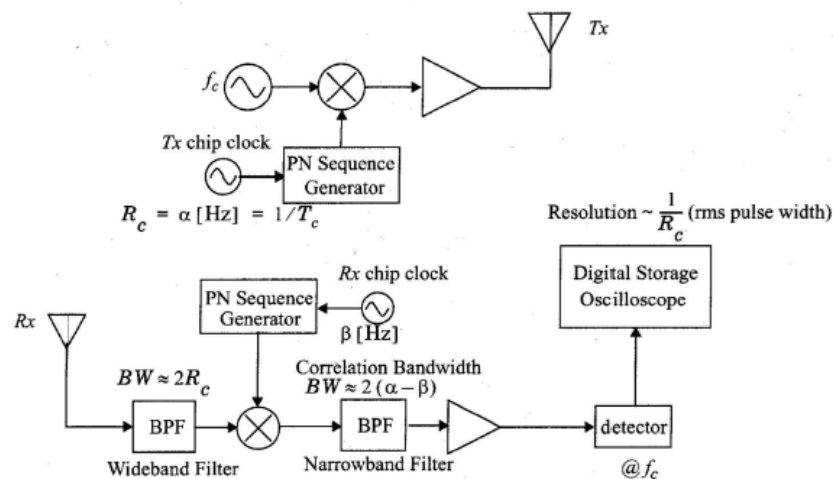


Fig.5 Esquema del sistema de de Correlador deslizante de espectro expandido [14]

### 2.2.3. Sistema de Medida de canal en el dominio de la frecuencia

Un analizador de redes vectorial controla un barrido de frecuencia mientras otra unidad monitoriza la respuesta en frecuencia del canal, capturando los parámetros S. El analizador captura en una determinada banda del espectro valores discretos de frecuencias intermedias de dicha banda. El número y el espaciado de los puntos de barrido tendrán un impacto en la resolución temporal de la medida de la respuesta al impulso.

Para cada paso del barrido, el equipo de medida de parámetros S transmite con un nivel de potencia conocido por el puerto 1 y monitoriza el nivel de señal recibido por el puerto 2. Mediante estos niveles de señal el analizador puede determinar la respuesta compleja del canal (parámetro S21) en un rango de frecuencias. Esta respuesta puede pasarse al dominio del tiempo usando la transformada discreta de Fourier inversa (IDFT), dándonos una versión limitada en banda de la respuesta al impulso.

Este sistema requiere una calibración cuidadosa previa, además de sincronización hardware entre transmisor y receptor, lo que provoca que este método sea adecuado para caracterizar entornos no muy grandes. Podemos observar un esquema del sistema en la figura 6.

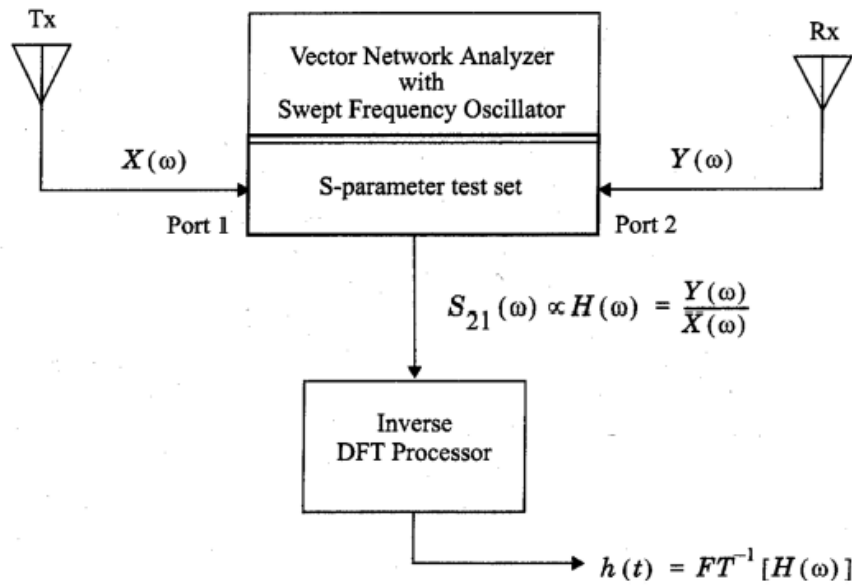


Fig.6 Esquema del sistema de de Medida en el dominio de la frecuencia [14]





# Capítulo 3:

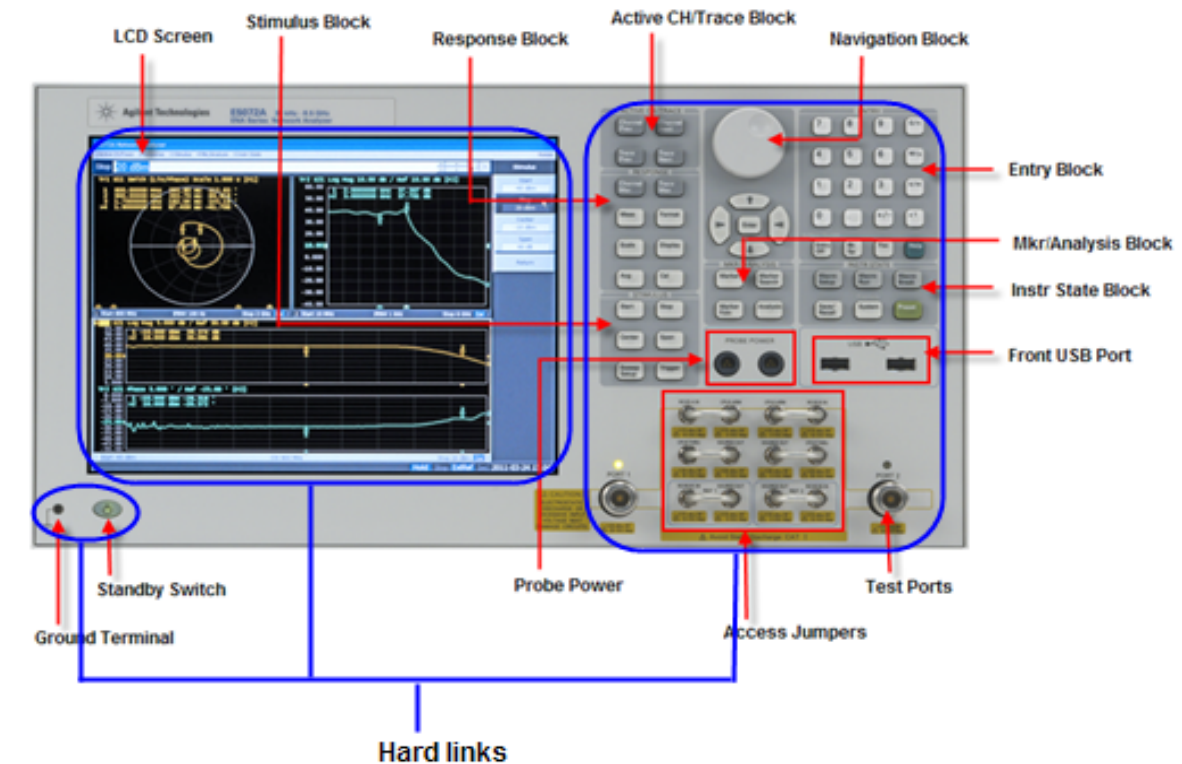
## Metodología de Medidas

Nuestro sistema de medidas se basa en el modelo teórico visto en el apartado 2.2.3, es un sistema de medida de canal en el dominio de la frecuencia. En este capítulo presentamos los elementos software y hardware que componen el sistema de medidas, y exponemos la interfaz gráfica que hemos desarrollado para facilitar el proceso de medida. También explicamos el proceso de captura de medidas, así como el procesado de dichas medidas para obtener resultados.

### 3.1. Elementos Hardware del Sistema de Medidas

#### 3.1.1. Agilent E5072A ENA Series Network Analyzer

El equipo mediante el cual nos apoyamos para la realización de medidas del canal fue un analizador de redes vectorial, equipo que de aquí en adelante también llamaremos VNA por sus siglas en inglés. El modelo concreto que empleamos fue el Agilent E5072A, modelo que observamos en la figura 7.



e5072a019.png

Fig.7 Analizador de redes vectorial empleado [17]

Este equipo es uno de los modelos más recientes de la familia de analizadores de la casa Agilent, y se trata de un modelo más rápido, versátil y preciso que sus predecesores [17]. Es adecuado tanto para caracterizar componentes activos y pasivos como para caracterizar canales de transmisión.

- Dos puertos, con rango de frecuencias de funcionamiento de 3 kHz a 8.5 GHz.
- Potencia de salida de hasta 20 dBm.
- Rango dinámico de hasta 151 dB.
- Rápida velocidad de medida, 7 ms con 401 puntos de medida.
- Jumpers conectados a elementos internos para mejorar la sensibilidad del VNA.
- Número máximo de puntos 20,001.

### 3.1.2. Cables Coaxiales y Conectores

Para conectar las antenas al VNA se emplearon conectores y cables coaxiales. Los coaxiales empleados en la medida del incendio eran de 20 metros de longitud, mientras que los empleados en BAN eran modelos de longitudes de entre 1 y 2 metros. También se emplearon transiciones de coaxiales para realizar las calibraciones.

### 3.1.3. Ordenador portátil SONY Vaio SVE17 y Cable USB tipo A-B.

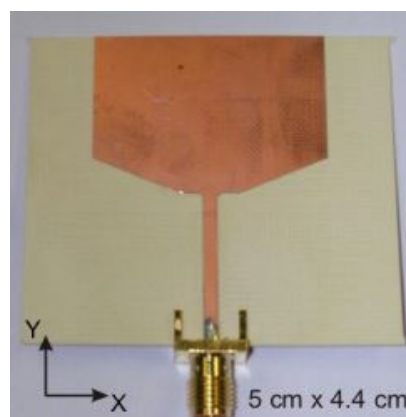
Estos son los elementos hardware empleados para controlar el VNA y automatizar las medidas. Este portátil, además de para controlar el VNA, es el que ha sido utilizado para realizar la interfaz gráfica y para realizar el post-procesado de las medidas obtenidas.

El VNA puede ser controlado con distintas interfaces: mediante interfaz LAN usando un cable Ethernet 10/100 BaseT (hasta 100 Mbps), utilizando una interfaz USB versión 2.0 (velocidades reales en torno a los 280 Mbps) o bien empleando una interfaz GPIB (velocidad menor a la ofrecida por USB 2.0) [17]. Escogimos la opción de la interfaz USB por facilidad de implementación y por ofrecer una velocidad superior al resto de opciones. El cable USB usado tiene un conector tipo A en uno de los extremos, que es el que va conectado al equipo portátil, y un conector tipo B en el otro extremo, conectado al VNA.

### 3.1.4. Antenas empleadas

Para la realización de los experimentos se emplearon cinco tipos de antenas. Se usaron tres antenas diferentes para UWB y dos antenas adecuadas para trabajar en la banda de ISM. Comentaremos algunos aspectos de su funcionamiento en este apartado para no tener que repetirlos en cada experimento en el que sean empleadas.

Presentamos primero las antenas empleadas en los casos de UWB. En la figura 8 podemos observar una de las dos antenas parche que empleamos. Las antenas parche son únicas que se utilizaron para caracterizar el canal radio en incendios. Estas antenas tienen una respuesta casi constante en la banda de frecuencias entre 3 y 10.6 GHz, y su patrón de radiación es teóricamente casi omnidireccional en los planos XY y XZ, a falta de caracterizarlas en una cámara anecoica.



**Fig.8 Antenas parche empleada para la caracterización de canal en UWB**

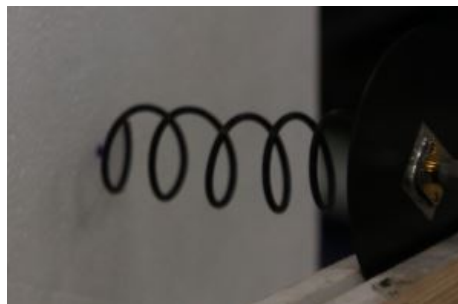
Estas antenas de tipo parche transmiten tanto en el aire como en el medio sintético en el que se realizarán las medidas en BAN (medio que explicaremos en profundidad en el capítulo 5). En los casos en los que fue necesario introducir la antena en el interior de dicho medio, se protegió mediante una capa de NBR (goma de nitrilo butadieno), material con el que se fabrican los guantes de laboratorio.

Otra de las antenas que se emplearon en UWB fue una cápsula implantable prestada por el profesor de la Universidad de Dresden (Alemania) Dirk Plattemeier, antena que vemos en la figura 9. Es una antena de dimensiones muy diminutas con patrón omnidireccional y cuyo funcionamiento abarca la banda de 3.1 a 4.8 GHz. Esta antena no transmite en el aire, mientras que sí lo hace en el interior del medio sintético. Por seguridad se protegió mediante varias capas de film de plástico transparente, fabricado a partir de la grana de polietileno.



**Fig.9 Antena implantable empleada para la caracterización de canal en UWB**

En un caso de medida de canal UWB en BAN en los que se transmitió fuera del medio sintético se empleó una antena direccional de tipo hélice. Esta antena, que presentamos en la figura 10, transmite en la banda de 3.1 a 4.8 GHz. Al ser la antena que se coloca fuera del medio sintético no fue necesario protegerla en ninguno de los casos.



**Fig.10 Antena hélice empleada para la caracterización de canal en UWB**

Pasamos a comentar algunos detalles de las antenas empleadas en los casos de ISM. La primera de ellas es la de tipo dipolo, antena prestada por el profesor Wout Joseph de la Universidad de Ghent, Bélgica [2]. El dipolo trabaja en la banda de 1.8 a 2.8 GHz aproximadamente, siendo necesario colocarlo de forma que las pérdidas por polarización sean las menores posible. La antena viene ya protegida para ser introducida en el medio sintético, es impermeable. Podemos observar un diagrama con las partes de las que consta el montaje en la figura 11.

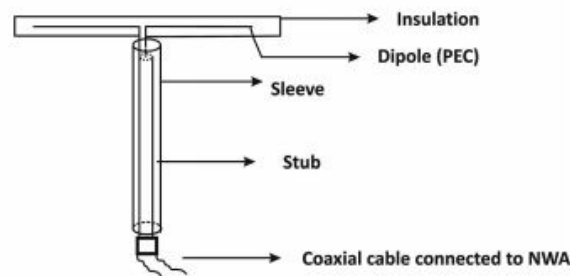


Fig.11 Esquema del dipolo empleado para la caracterización de canal en ISM [2]

En los casos de medidas de canal ISM en BAN en los que se transmitió fuera del medio sintético se empleó una antena direccional de tipo hélice, como la que vemos en la figura 12, antena que trabaja en una banda de trabajo menor que la hélice que vimos para UWB. Al no tener que introducirla en el interior del medio en ningún momento, no fue necesario protegerla mediante ningún material.

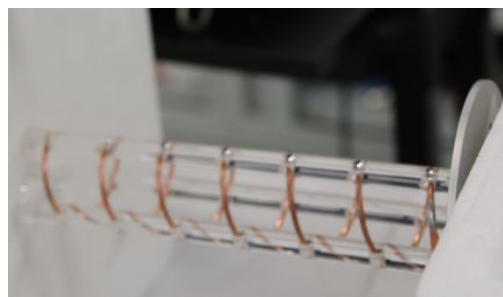


Fig.12 Antena hélice empleada para la caracterización de canal en ISM

### 3.2. Elementos Software del Sistema de Medidas

En esta sección explicaremos la interfaz gráfica que hemos creado para facilitar el proceso de medida y posteriormente detallaremos todos los elementos software instalados en el ordenador portátil que han sido necesarios para que la interfaz funcione. El motivo de crear esta aplicación es que gracias a ella conseguimos configurar el VNA de forma más rápida y sin necesidad de tocar físicamente el dispositivo, calibrarlo en un momento y guardar las medidas sin intervención manual.

Como queremos emplear el máximo número de puntos que nos permite el equipo de medida al generar nuestras trazas, éstas tardan bastante más en estar actualizadas de lo normal (pasamos de décimas de segundo si empleamos los 401 puntos habituales a prácticamente siete segundos). Con este programa conseguimos que nada más se haya actualizado una traza ésta se guarde y empezamos a registrar la siguiente, sin pérdidas de tiempo adicionales, muy útil al salvar las trazas en el caso del incendio.

La interfaz gráfica de usuario (GUI, figura 13) se realizó mediante MATLAB GUIDE (entorno de desarrollo de GUI) proporciona herramientas para diseñar interfaces de usuario para aplicaciones personalizadas. Mediante el editor de diseño de GUIDE, es posible diseñar gráficamente la interfaz de usuario. GUIDE genera entonces de manera automática el código de MATLAB para construir la interfaz, el cual se puede modificar para programar el comportamiento de la aplicación.



Fig.13 Interfaz gráfica para la configuración del VNA y la captura de medidas

Con GUIDE podemos crear cajas de texto no editables y editables. Estos últimos son muy útiles ya que contendrán los parámetros para configurar el equipo y guardar las medidas. También podemos crear grupos de botones, útil para seleccionar entre dos opciones (por ejemplo, entre captura continua y número de trazas concretas). Por último tenemos las celdas de botones: al pulsarlos se iniciará la subrutina asociada a dicho botón.

Si bien los elementos que dan cuerpo a la interfaz tienen su código asociado en la rutina principal de la misma, son las subrutinas asociadas a los botones las que contienen la funcionalidad de la aplicación. Podemos verlas en el Anexo I.

Antes de comenzar las medidas es necesario configurar el equipo. Para ello, tenemos que definir los siguientes parámetros en la interfaz gráfica:

- Número de Puntos: Controla el total de muestras que se tomarán para cada traza en el rango establecido de frecuencias. Cuanto mayor sea, mejor resolución frecuencial tendrán nuestros resultados, pero más lenta será la medida. Usaremos generalmente 20001 puntos.
- Start Freq. (GHz): Primera frecuencia del rango a analizar. La mínima que podemos emplear es la mínima del analizador, 30 kHz, pero generalmente serán las antenas empleadas y el tipo de experimento los que la fijen.
- Stop Freq. (GHz): Última frecuencia del rango a analizar. La máxima que podemos usar, restringida por el analizador, es 8.5 GHz, que generalmente será la limitante (salvo que el tipo de experimento requiera otra).
- BW Resol. (kHz): Sirve para observar el espectro con más detalle, cuanto menor sea más estrecho será el filtro y menos ruido habrá. Emplearemos en general un ancho de 3 kHz.
- Potencia (dBm): Será la potencia inyectada a la antena transmisora, normalmente inyectaremos una potencia del orden de 10 dBm.
- Ruta de Guardado (D:/Prueba...): Seleccionamos el fichero donde se guardarán las trazas, con el formato indicado entre paréntesis. El programa empleado comprobará si dicho directorio existe y, si no es así, lo creará.
- Nombre de los ficheros .csv: Introducimos el nombre que tendrán las trazas. Éstas se numerarán automáticamente conforme se vayan guardando.
- Tipo de Captura: Elegimos bien registrar de forma continua o guardar un número concreto de trazas.
- Número de Trazas: Necesario sólo en el caso de querer salvar un número concreto de trazas, seleccionamos cuántas.

Una vez estén estos parámetros introducidos (los referentes al guardado y al número de trazas se pueden introducir antes de capturar las medidas) podemos proceder a la *Configuración* pulsando el botón correspondiente. Si la configuración se realiza de forma correcta aparecerá un mensaje de color verde en el campo *Info* indicando la conexión establecida.

Cuando el equipo esté configurado, se podrá *Calibrar* para no tener en cuenta las pérdidas ni las curvaturas de los cables, calibración de tipo THRU. Para realizarla, antes de presionar el comando unimos los extremos de los cables coaxiales que van a las antenas mediante una transición.

Una vez hayamos colocado las antenas, podremos *Comenzar la captura*. Se realizará un número preestablecido de capturas o se realizará de forma continua en función del tipo de captura escogido. Cualquiera que sea la opción que hayamos elegido al capturar podemos parar la captura pulsando el botón *Final Captura*. Se muestra el número de capturas realizadas en *Capturas Totales*. Podemos realizar otra tanda de medidas sin necesidad de volver a configurar el equipo, eso sí, si no cambiamos de directorio es aconsejable nombrar a las medidas con otro nombre para que no sobrescriban las anteriores.

Generalmente al parar una tanda de capturas manualmente no se detendrá de forma instantánea. Esto es así puesto que al estar en una subrutina devolvemos el control a la interfaz sólo en algunas pausas de centésimas de segundo; en una de ellas se detecta una solicitud de parada, tras la cual surge un cuadro de diálogo en la que la confirmaremos la parada.

### 3.2.1. MATLAB con Instrument Control Toolbox.

MATLAB es necesario tanto para crear la aplicación como ejecutarla. MATLAB es un lenguaje de alto nivel y un entorno interactivo para el cálculo numérico, la visualización y la programación [18]. Mediante MATLAB, es posible analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos o aplicaciones (como vimos en la sección anterior). El lenguaje, las herramientas y las funciones matemáticas incorporadas permiten explorar diversos enfoques y llegar a una solución antes que con hojas de cálculo o lenguajes de programación tradicionales, como pueden ser C/C++ o Java™.

MATLAB se puede utilizar en una gran variedad de aplicaciones, tales como procesamiento de señales y comunicaciones, procesamiento de imagen y vídeo, sistemas de control, pruebas y medidas, finanzas computacionales y biología computacional. Más de un millón de ingenieros y científicos de la industria y la educación utilizan MATLAB, el lenguaje del cálculo técnico.



MATLAB es también un entorno muy adecuado para enviar comandos de control a otros dispositivos, en concreto al VNA. La Instrument Control Toolbox permite conectar MATLAB directamente a instrumentos como osciloscopios, generadores de funciones y, también, analizadores de redes vectoriales. Esta toolbox nos permitirá, gracias a unas librerías instaladas de IVI Foundation (que veremos más adelante), comunicarnos con el VNA desde el entorno MATLAB mediante comandos de texto SCPI empleando el protocolo VISA sobre USB.

### 3.2.2. Agilent IO Libraries Suite 16.

Esta suite es una colección de librerías y programas con diferentes utilidades necesaria para comunicarnos con nuestro equipo, permitiéndonos en nuestro caso establecer una conexión USB entre el MATLAB de nuestro portátil y el VNA. También permite la interoperabilidad entre otro entorno de programación (por ejemplo los mencionadas en el apartado anterior) mediante otras interfaces (LAN, USB, RS-232).

La suite debe estar instalada tanto en el equipo portátil como en el propio VNA. En ella nos aparecerá una lista de las interfaces abiertas en ese momento (con un tick verde), así como las conexiones que hemos establecido históricamente con el VNA (con una cruz roja si están inactivas), como vemos en la figura 14. El programa detectará automáticamente los equipos conectados al ordenador, y nos dará una dirección para trabajar con ellos.

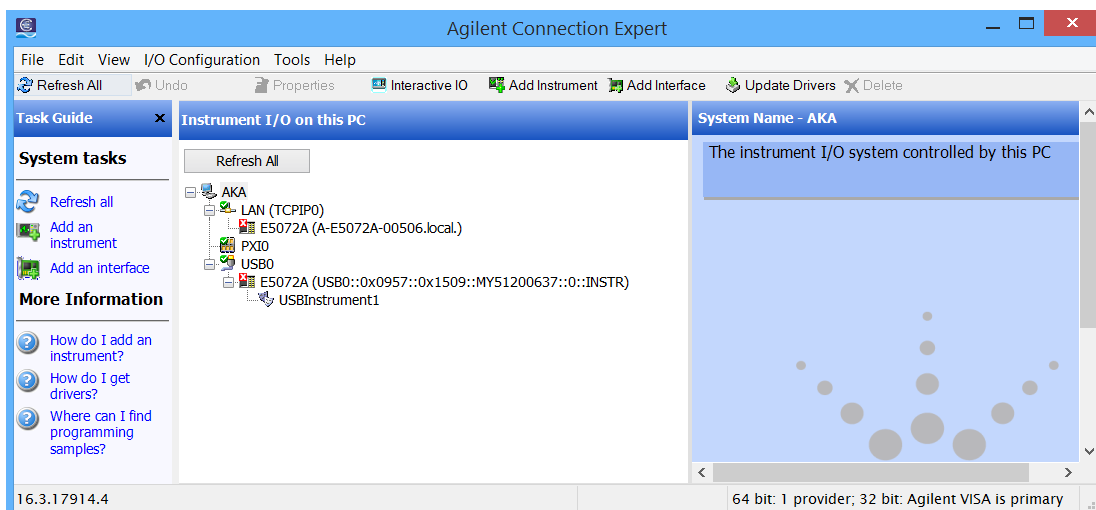


Fig.14 Interfaz de la suite de Agilent

Otra posibilidad que tuvimos en cuenta fue controlar el VNA desde el Windows XP del propio equipo. Para ello hubo que hacer varias cosas: instalar el entorno MATLAB para enviar los comandos, habilitar SICL (*Standard Instrument Control Library*) en el entorno VNA y configurar manualmente en la suite del VNA el propio equipo como cliente. Una vez lo tenemos, disponemos de una dirección LAN para controlar al VNA desde el MATLAB instalado en él mismo.

A pesar de que esta opción era muy ventajosa en cuanto a que necesitábamos muchos menos elementos para automatizar las medidas, fue descartada puesto que ralentizaba demasiado el equipo.

### **3.2.3. IVI Foundation shared drivers, y drivers específicos para el control de equipos Agilent mediante MATLAB.**

IVI Foundation es un consorcio abierto fundado para promover especificaciones para controlar o testear distintos tipos de instrumentos [19]. Su finalidad es simplificar la interoperabilidad entre fabricantes, facilitar la implementación de soluciones y reducir el coste y desarrollo del software necesario. Una librería que incluyen los drivers comunes es VISA (*Virtual Instrument Software Architecture*), la cual nos permitirá conectarnos desde nuestro portátil vía USB.

SCPI (*Standard Commands for Programmable Instruments*) es un lenguaje estándar común empleado para controlar instrumentos de distintos fabricantes. Su sintaxis es texto ASCII, compatible tanto con lenguajes de programación (BASIC, C, C++...) como con entornos más específicos (LabVIEW, MATLAB, Microsoft Visual Studio, Agilent VEE...). Creado inicialmente por el SCPI Consortium, forma parte de los estándares actuales de IVI Foundation puesto que dicho consorcio se adhirió a la misma en 2003.

Una vez instalados los drivers comunes y gratuitos que nos ofrece IVI Foundation es necesario complementarlos con unos drivers específicos en función del entorno en el que vamos a programar y del dispositivo a controlar. En nuestro caso, nos hizo falta un controlador para MATLAB de 64 bits que nos permitiera trabajar con un equipo de Agilent.

## **3.3. Realización y Procesado de las medidas**

Una vez tenemos los drivers instalados en el ordenador portátil podemos proceder a realizar las medidas de canal con la ayuda de la interfaz, basándonos en el sistema descrito en la sección 2.2.3. Este procedimiento se seguirá tanto para el ensayo del incendio como para los experimentos realizados en BAN.

### **3.3.1. Configuración del equipo**

Primero se configurará el VNA desde la interfaz para que trabaje con una potencia determinada (la de la antena transmisora), en una banda de frecuencias definida y con un número de puntos de medida con los que la resolución frecuencial sea suficiente. También seleccionaremos el ancho del filtro de frecuencia intermedia

**3.3.2. Calibración del sistema**

Una vez está configurado el equipo se conectarán al mismo los cables coaxiales que se emplearán para posteriormente conectar las antenas. Estos cables se unirán mediante una transición hembra-hembra, y se procederá a realizar una calibración tipo "THRU" para no tener en cuenta las pérdidas que introducen dichos cables. El equipo de medida generará un fichero de calibración que será guardado, ya que si por algún motivo se desconfigura el equipo no será necesario repetir todo el proceso.

**3.3.3. Captura de las medidas**

Una vez el sistema está calibrado, procedemos a retirar la transición y a conectar las antenas en los extremos de los cables coaxiales. Comprobaremos que las antenas funcionan de forma adecuada observando los parámetros de reflexión en el equipo (S11). Si los valores de dicho parámetro están por debajo o en torno a los 10 dB en la banda de trabajo podemos afirmar que las antenas están funcionando correctamente.

Colocaremos las antenas a la altura deseada, aproximadamente la misma para ambas, enfrentándolas de forma que las pérdidas por desalineamiento sean las mínimas posibles. Se protegerán las antenas, así como los cables coaxiales, en los casos que sea necesario para evitar fallos de funcionamiento o posibles roturas. Para ello emplearemos los elementos que sean necesarios y que se expondrán en los apartados correspondientes.

Una vez tenemos todo preparado podemos proceder a realizar las mediciones, capturando el parámetro de transmisión (S21) mediante el equipo de medida.

**3.3.4. Procesado de las medidas**

Una vez se han realizado las medidas del canal necesarias, pasamos a procesarlas y a obtener los parámetros de caracterización del canal radio cuya teoría estudiamos en capítulos anteriores, así como a presentar gráficos y otros coeficientes que ayuden a entender mejor el comportamiento del canal.

Para realizar este procesado emplearemos también MATLAB, herramienta que como hemos visto ha resultado de gran ayuda también para enviar comandos de control al VNA y para crear la interfaz gráfica. En la figura 15 podemos observar la interfaz de trabajo.

Las medidas capturadas mediante el analizador se corresponden con el parámetro de transmisión  $S_{21}(f, d)$ , dependiente de la frecuencia y de la distancia entre antenas, dándonos información de módulo y fase para cada frecuencia analizada. Una vez tenemos estas trazas, podemos conformar la respuesta en frecuencia empleando el código MATLAB que podemos observar en la ecuación (10).

$$H = Mod .* \exp\left(1i * \frac{Fase}{180} * pi\right) \quad (10)$$

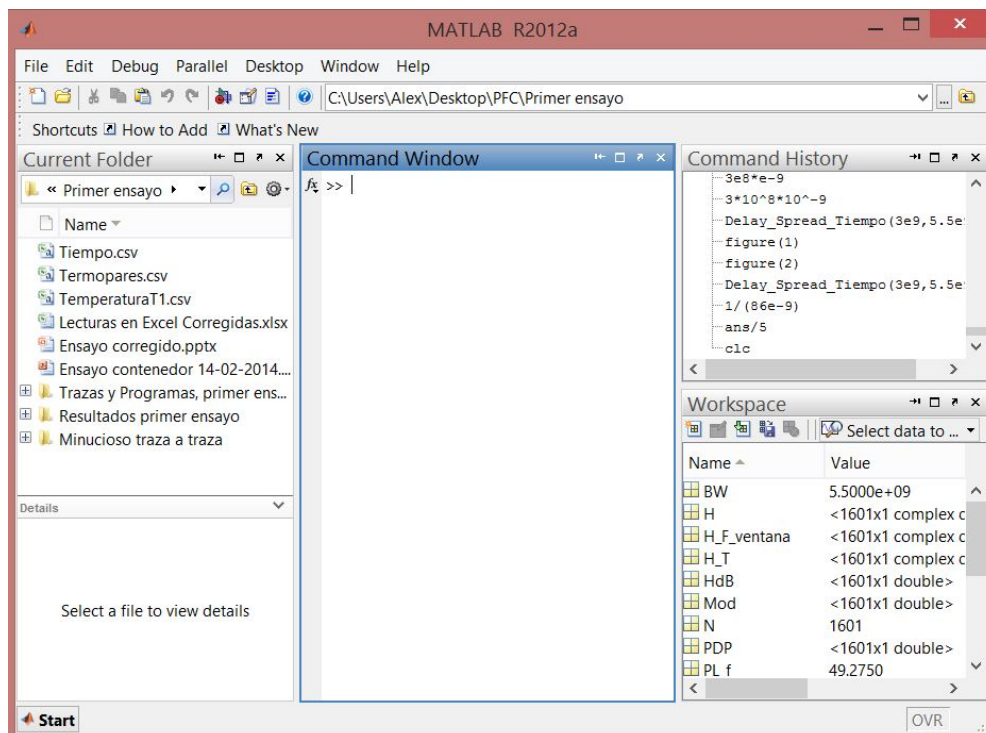


Fig.15 Interfaz de trabajo de MATLAB

Como comentamos en el segundo capítulo, se pueden calcular las pérdidas de propagación a partir de la respuesta en frecuencia del canal, y para ello usaremos el código MATLAB que podemos observar en las ecuaciones (11), (12) y (13).

$$HdB = 20 .* \log_{10}(abs(H)) \quad (11)$$

$$Hsel = H(HdB > Umbral\_Ruido) \quad (12)$$

$$Lprop = -10 .* \log_{10}(mean(abs(Hsel).^2)) \quad (13)$$

Como podemos observar,  $Hsel$  corresponde al conjunto de valores de  $H$  que están por encima del umbral de ruido del caso analizado. Las pérdidas de propagación de una determinada banda de frecuencias se calculan con la respuesta en frecuencia en unidades lineales, y después se pasan a unidades logarítmicas.

Un aspecto importante a la hora de determinar el PDP es la resolución temporal que dispongamos. Esta resolución vendrá determinada por el ancho de banda, y el rango temporal en el que tendremos información vendrá determinado por el número de puntos. Esto es, si nuestra banda a analizar tiene un ancho de banda de 1 GHz y empleamos 1001 puntos, la resolución temporal será de  $\Delta t = \frac{1}{BW} = 1 \text{ ns}$  y analizaremos un periodo de 1000 ns.

A partir de la respuesta en frecuencia podemos calcular asimismo el perfil de retardo conforme con la ayuda del código MATLAB que podemos observar en las ecuaciones (14), (15) y (16).

$$H\_Enventanado = H .* \text{hamming}(\text{lenght}(H)) \quad (14)$$

$$h = \text{ifft}(H\_Enventanado) \quad (15)$$

$$PDP = 10 * \log_{10}(\text{abs}(h).^2) \quad (16)$$

Hasta aquí hemos observado las fórmulas escritas en código MATLAB para calcular la respuesta en frecuencia, las pérdidas de propagación y el Power Delay Profile, que son los parámetros más importantes que vamos a calcular. El resto de código para calcular otros parámetros se puede observar los scripts empleados para procesar las medidas en los Anexos II y III.



# Capítulo 4:

## Caracterización del canal radio en incendios

En este apartado analizaremos en profundidad el comportamiento del canal radio UWB en caso de incendios en interiores. Antes de explicar cómo se realizaron las medidas, realizaremos una pequeña revisión acerca de mecanismos de degradación que pueden aparecer en las comunicaciones durante incendios. Posteriormente se enunciarán los elementos empleados, cómo se hicieron las medidas y comentaremos las distintas fases simuladas en el incendio. Más adelante se expondrán y comentarán los resultados obtenidos.

### 4.1. Mecanismos de degradación

El objeto del estudio que vamos a realizar trata de comprobar la existencia y, si se da el caso, de cuantificar los posibles mecanismos de degradación de la señal en la banda de UWB que puedan aparecer durante una transmisión en el ámbito de la lucha contra los incendios en un entorno indoor.

Uno de los mecanismos que vamos a estudiar es la temperatura [20], que puede provocar cambios en el índice de refracción del entorno, veremos si un aumento de la misma conlleva una degradación del nivel de la señal o por el contrario no afecta o no se aprecia dicha degradación en la transmisión.

Otro de los mecanismos que se estudiarán será la presencia de humo [20], si bien en el caso de que afectara a la señal sería difícil diferenciar si la posible degradación es causada por el humo o es por otros mecanismos. Para modificar la distribución del humo se variarán las condiciones del experimento cambiando los flujos del aire, como veremos en apartados posteriores.

En la extinción de un incendio, al emplear agua, se genera vapor de agua a alta temperatura que puede afectar a la señal [21]. Del mismo modo analizaremos si la aparición de dicho vapor de agua conlleva o no una degradación en la potencia de la señal, aunque a priori no se espera pues es a partir de los 10 GHz en los que la absorción por vapor de agua comienza a afectar a las frecuencias de microondas.

Uno de los factores más problemáticos a la hora de realizar una comunicación durante el transcurso de un incendio es el plasma de las llamas [22], ya que puede llegar a inutilizar un enlace de comunicaciones. En el siguiente apartado analizaremos bajo qué condiciones se produce y cuanto puede llegar a afectar.

### 4.1.1. Efecto del plasma en incendios

Las llamas del fuego pueden pertenecer, bajo ciertas condiciones, al estado fundamental de la materia conocido como plasma. Como primera aproximación, podemos decir que un plasma es un gas de partículas cargadas. En la materia "neutra" las cargas eléctricas forman enlaces en forma de átomos, moléculas, redes cristalinas etc. Cuando aumenta la temperatura de esta materia hasta valores comparables a las energías de enlace, estos enlaces se rompen de forma que sus constituyentes cargados (electrones e iones en el caso de los átomos) no se encuentran entrelazados entre sí, sino que cada partícula cargada se mueve en los campos electromagnéticos creados por las otras. Los plasmas formados por ionización de constituyentes neutros tienden a contener el mismo número de cargas positivas y negativas en cualquier volumen grande comparado a la separación típica entre partículas [23].

Uno de los parámetros más importantes relacionados con las comunicaciones es la frecuencia de oscilación del plasma. Una onda electromagnética que incide en un plasma sufrirá una reflexión total si no supera dicha frecuencia de oscilación [24]. Este fenómeno lo observamos en las ondas en la ionosfera: las señales de televisión pueden atravesar el plasma que contiene pero señales de frecuencias menores puede que sean rebotadas de nuevo hacia la superficie terrestre.

Existe una fórmula para determinar dicha frecuencia, que depende principalmente de la densidad de electrones en el volumen del plasma a estudiar. Podemos observar dicha fórmula en la ecuación (17).



$$\frac{\omega p}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{n_e q^2}{\epsilon_0 m_e}} \approx 8.980 \sqrt{n_e} \quad (17)$$

En esta función vemos la dependencia de la frecuencia de oscilación con determinadas constantes conocidas como son la masa y la carga del electrón y la permitividad del vacío, así como con una variable cambiante como es la densidad de electrones, en  $m^{-3}$ .

La dificultad de encontrar la frecuencia de oscilación en una llama radica en estimar dicha densidad de electrones  $n_e$ , pues las condiciones son muy cambiantes: dependerá del combustible, de los aditivos empleados, del paso del tiempo...

En una primera aproximación, diversos estudios concluyen que las llamas en condiciones típicas posee una densidad de electrones de entre  $10^{12}$  y  $10^{15} m^{-3}$ , que corresponden a frecuencias de oscilación inferiores a los 500 MHz, como vemos en la figura 16.

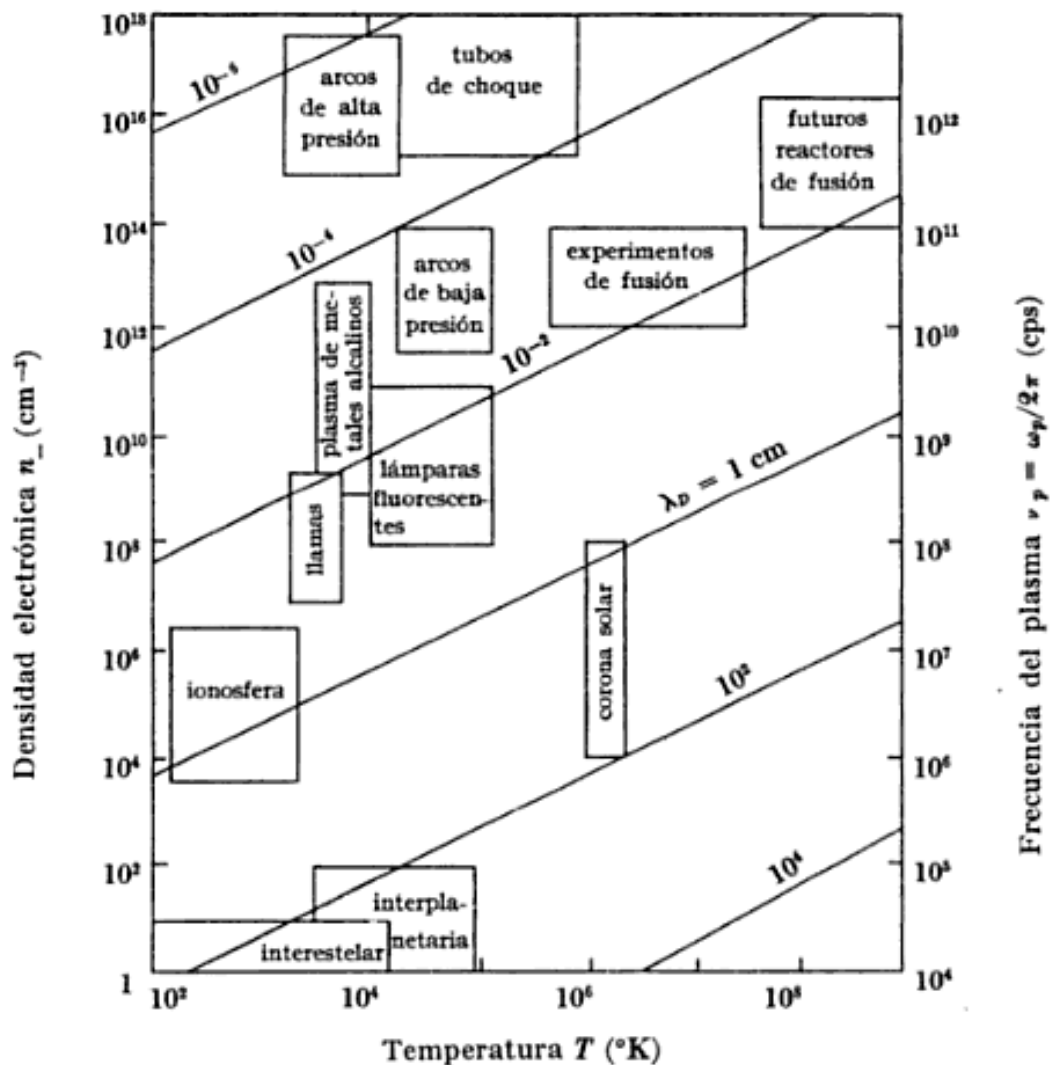


Fig.16 Condiciones en las que se produce plasma [24]

De todos modos, las características de los fuegos que nos podemos encontrar pueden variar y mucho respecto a los casos típicos. Como comentamos anteriormente, si en la combustión se emplean determinados materiales y/o componentes químicos la densidad de electrones puede verse incrementada a valores de entre  $10^{18}$  y  $10^{19} \text{ m}^{-3}$ , incrementando la frecuencia de oscilación del plasma hasta los 10 GHz. No obstante, para ello se requieren condiciones químicas muy especiales como para que se den incendios de estas características de forma natural.

Uno de los estudios que se han realizado para frecuencias inferiores al gigahercio mostró resultados muy significativos en esta materia [22]. Se provocaron tres incendios empleando como combustible materia vegetal, en concreto restos, hojas y ramas de eucalipto. En los incendios A y B se emplearon hidrocarburos y en el C se empleó sulfato de potasio ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ). Observamos los resultados en las figuras 17 y 18.

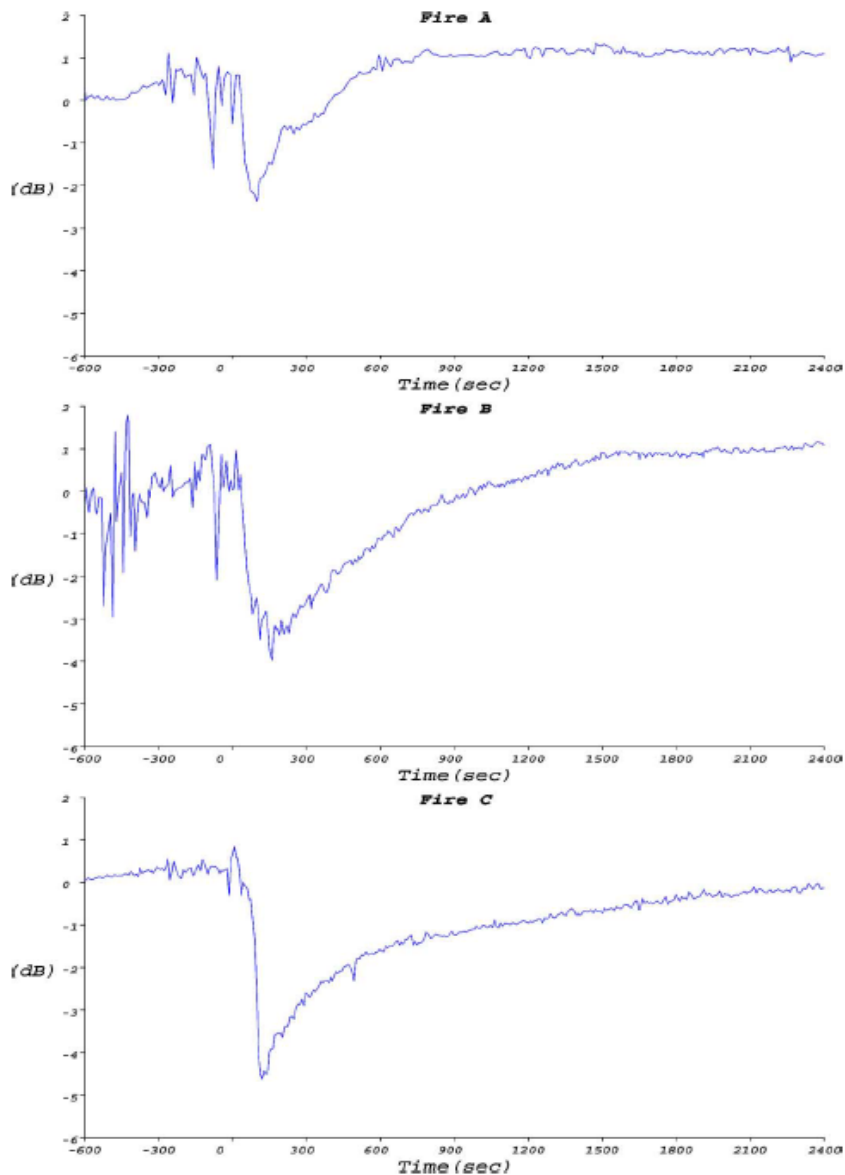
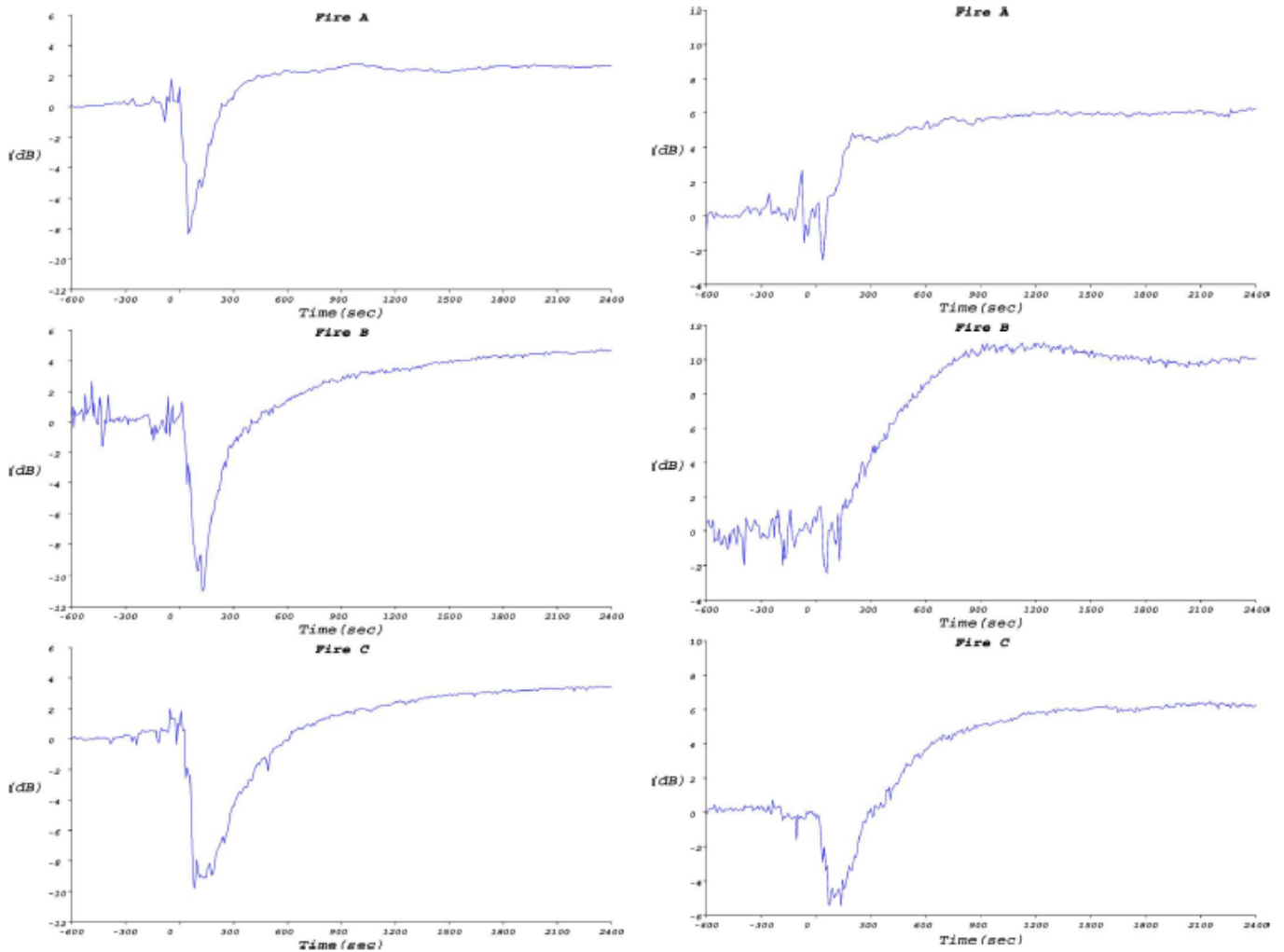


Fig.17 Potencia relativa recibida en la banda de 160-180 MHz [22]



**Fig.18 Potencia relativa recibida en las bandas de 400-450 MHz (izquierda) y 850-950 MHz (derecha) [22]**

Se pudo observar que en las bandas centradas en 170 y 425 MHz el nivel de señal cae durante los primeros cinco minutos bastante con respecto al caso sin fuego, entre 4 y 15 dB. Para la banda más alta, centrada en 900 MHz, apenas observamos caída de potencia en los dos primeros fuegos, sí en el tercero.

Podemos aventurar que la densidad de electrones en los dos primeros fuegos es menor al del tercero, aumentada por el potasio, haciendo que en este último incendio la frecuencia de oscilación sea mayor y por tanto el efecto del plasma sea apreciable a mayores frecuencias.

Si la densidad de electrones supera valores entorno a los  $10^{19} \text{ m}^{-3}$  se introduce un nuevo término en la fórmula para calcular la frecuencia de oscilación del plasma [24], debido a los efectos de la velocidad térmica del electrón, como observamos en la ecuación (18).

$$\frac{\omega p}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{n_e q^2}{\epsilon_0 m_e} + \frac{3k_B T_e k^2}{m_e}} \quad (18)$$

En esta ecuación, además de estimar la densidad de electrones, es necesario estimar del mismo modo la temperatura del electrón. De todos modos, en nuestro proyecto este término será despreciado pues las densidades que encontraremos no alcanzarán valores tan elevados, y por tanto la temperatura del electrón, en términos energéticos, será muy baja.

Otro factor relacionado con la ionización del fuego es que si dicha ionización es excesiva puede provocar desviaciones en la fase que conlleven desvanecimientos de la señal, siendo otro factor más degradación a añadir a los ya mencionados en el apartado anterior [25].

## 4.2. Configuración del experimento

Las medidas se realizaron poco después de iniciar el proyecto, el 14 de Febrero de 2014. Se hicieron en una zona apartada en Mercavalencia habilitada para diversos entrenamientos que suelen realizar los bomberos, con la asistencia de cuatro de ellos. Para simular un entorno de interiores, se provocó el incendio en el interior de un contenedor (figura 11). Las medidas del contenedor metálico son 12.192 x 2.438 x 2.590 metros. Las puertas laterales y de fondo fueron bastante útiles para colocar los elementos de medida y para permitir diferentes distribuciones de humo durante el incendio, como veremos.

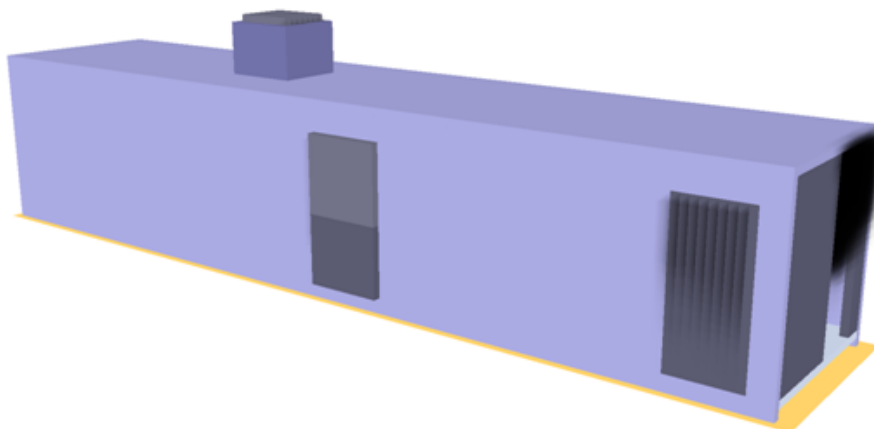


Fig.19 Esquema del contenedor en el que se realizó el ensayo

### 4.2.1. Elementos empleados y disposición de los mismos

Se seguirá el procedimiento definido en el apartado 3.3, midiendo directamente en el dominio de la frecuencia, empleando los elementos que vemos a continuación:

- Analizador de redes vectorial Agilent E5072A.
- Un par de cables coaxiales de 20 metros.
- Antenas tipo parche UWB (fig.8)
- Elementos de fijación y protección para las antenas (gorras térmicas, paneles de fibra de vidrio, cinta adhesiva).
- Cámara térmica.
- Termopares para la medida de temperatura.
- Pira de combustible (palés, hidrocarburos).

Los bomberos se encargaron de colocar la pira de combustible en el interior del contenedor, como vemos en la parte izquierda de la figura 20. El combustible estaba formado principalmente por palés de madera y por elementos hidrocarburos para incrementar la velocidad de la combustión. Esta pira fue colocada en la zona central del contenedor, sin llegar a obstruir a priori la línea de visión (LOS) del rayo directo entre las antenas.



**Fig.20 Colocación del combustible y de los termopares en el interior del contenedor**

Los bomberos también colocaron una serie de termopares encargados de medir la temperatura a diferentes alturas: a 1, 1.5, 2 y 2.2 metros sobre el suelo, en la zona del contenedor que vemos a la derecha de la figura 20. La información recogida por los termopares era enviada a un equipo portátil de los bomberos.

Cada una de las antenas fue colocada sobre un trípode en los extremos del contenedor, justo en las oberturas, para protegerlas frente a las elevadas temperaturas. Con la misma finalidad también se usó un gorro térmico como el que vemos en la parte derecha de la figura 21. Se hicieron pruebas de reflexión y transmisión para comprobar que dicho gorro no afectaba a la señal en las frecuencias de trabajo.

La cámara térmica se colocó al lado de una de las antenas, y con ella registramos todo el incendio y así se tuvo otra referencia de temperaturas además de la de los termopares. También se trató de exponer en menor medida posible al calor.

Conectamos las antenas al analizador de redes, situado en el interior del camión de bomberos, mediante los cables coaxiales de 20 metros. Tratamos de aislar los cables a las altas temperaturas lo máximo posible, por ello se recubrieron empleando paneles de fibra de vidrio. Podemos ver dicho camión y la cámara térmica en las figuras 21 y 22.



**Fig.21 Antenas y cámara empleadas junto a los elementos protectores**



**Fig.22 Camión de bomberos en el que colocamos el VNA**

En la figura 23 representamos un esquema de la distribución de los elementos en el interior del contenedor. En este esquema se puede ver la puerta de la pared lateral que nos permitirá controlar los flujos de aire, así como la forma de las oberturas tras las cuales colocamos las antenas.

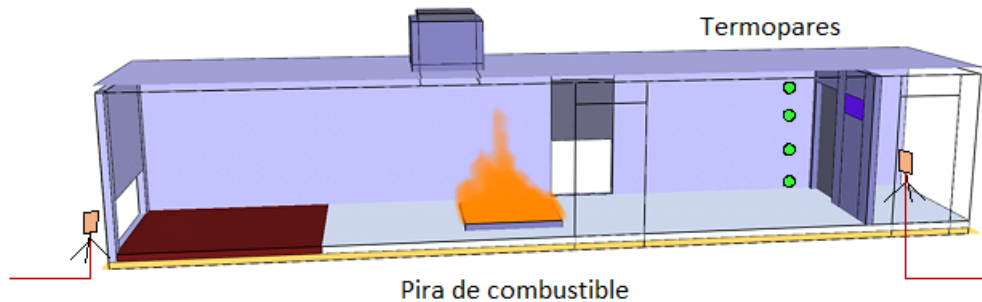


Fig.23 Distribución de los elementos en el contenedor

#### 4.2.2. Metodología de medida

Los parámetros de configuración los podemos observar en la tabla 1. Para realizar el experimento escogimos 3 GHz como frecuencia inicial puesto que corresponde a la mínima frecuencia en la que las antenas se comportan de forma, mientras que como frecuencia final elegimos la correspondiente a la máxima frecuencia de trabajo del analizador de redes.

Número de Puntos del VNA	1601
Rango de Frecuencias	3GHz a 8.5 GHz
Ancho de banda de resolución	3 kHz
Potencia suministrada tx.	10 dBm
Nivel de ruido	-105 dBm

Tabla 1. Configuración del equipo y nivel de ruido

Una vez se configuró el equipo con los parámetros requeridos, se procedió a calibrar, siempre siguiendo los pasos expuestos en el apartado 3.3. Una vez calibramos, pasamos a realizar las primeras medidas, aún sin iniciar el incendio. Éstas serán las medidas que tomamos de referencia a 22°C (según los termopares, gestionados por bomberos). Emplearemos estas trazas para obtener resultados referenciados a ellas, esto es, obtendremos resultados diferenciales para observar los cambios en el comportamiento del canal.

Una vez se inició el incendio se tomaron medidas del parámetro de transmisión (S21) de forma continua, marcando dicha opción en la interfaz gráfica, de este modo nada más se termina de realizar una medida se inicia la siguiente. De forma paralela la cámara térmica fue grabando el experimento y los termopares fueron registrando la temperatura.

### 4.2.3. Fases del incendio

Como hemos comentado, se inició el incendio y comenzamos a guardar las medidas del parámetro S21. Paralelamente se estaban registrando las medidas de los termopares (tomando muestras cada segundo) y se estaba grabando el incendio mediante la cámara térmica. En la figura 24 podemos observar algunas instantáneas del incendio tomadas desde las entradas del contenedor.



Fig.24 Imágenes del incendio

Para emular las condiciones que tienen lugar en incendios reales se distinguieron cuatro fases en el mismo:

- El incendio comenzó con las puertas laterales cerradas, sin que apenas entrase aire (sólo entra por las aberturas en las que están las antenas). El colchón de humo que se fue generando baja a la altura de las antenas.
- A los 5 minutos se abrieron dichas puertas, produciéndose una entrada de aire que produjo una pequeña bajada de la temperatura pero que después volvió a crecer rápidamente debido a que el incendio se avivó. El motivo de abrir las puertas es provocar que el colchón de humo suba un poco.
- En el inicio de la fase de extinción se cerraron de nuevo las puertas laterales. La densidad del humo, así como la temperatura, comenzó a descender al cabo de un rato.
- En la fase final los bomberos entraron en el interior y comenzaron a apagarlo mediante agua. La temperatura cayó radicalmente y se generó una cantidad importante aunque controlada de vapor de agua.



## 4.3. Resultados

### 4.3.1. Temperatura

Como comentamos anteriormente, los bomberos colocaron cuatro termopares a diferentes alturas cerca de una de las entradas para monitorizar la temperatura del aire en el interior del contenedor. Dos de ellos, los de alturas intermedias, fallaron a los pocos minutos de comenzar el experimento. En cuanto a los otros dos, el más alto (2.2 metros) no registró completamente el incendio pero se pudo interpolar la información que faltaba, mientras que el más bajo (1 metro) funcionó perfectamente. Podemos observar las temperaturas que registraron en la gráfica 25.

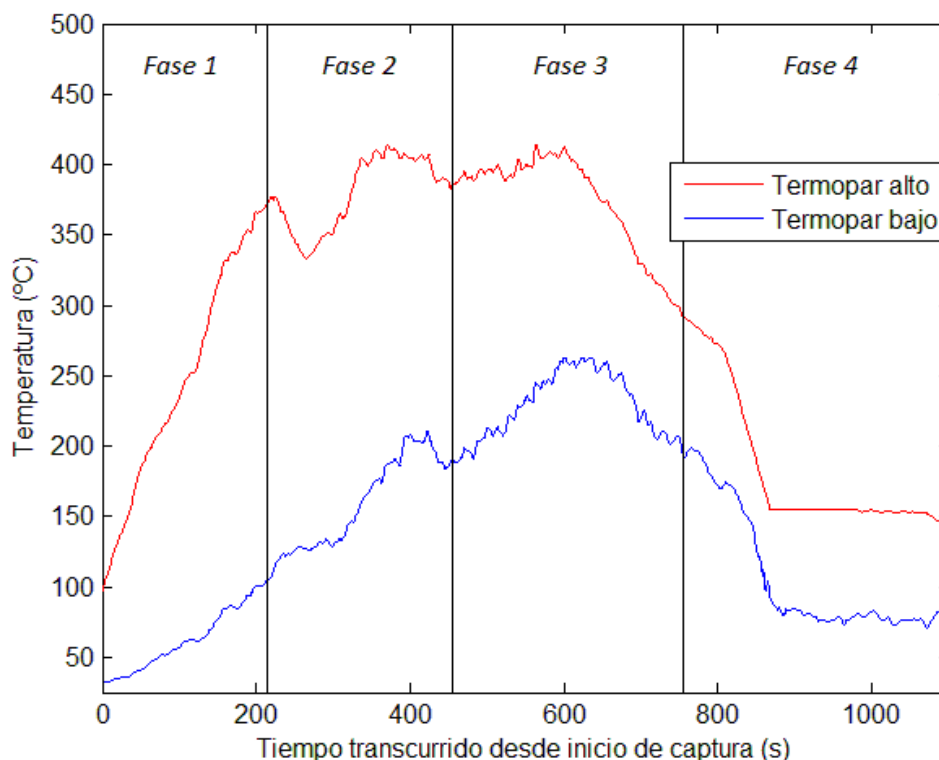


Fig.25 Temperatura monitorizada por los termopares durante el incendio

La temperatura del incendio alcanzó temperaturas superiores, según la cámara térmica entorno a los 1000°C. Tampoco se quiso provocar una temperatura excesiva para no dañar las antenas.

Podemos observar en la imagen las etapas enunciadas en el apartado anterior: la fase inicial en la que empieza el incendio con las puertas laterales cerradas, en la que la temperatura crece de forma muy pronunciada, el momento en el que se abren las puertas laterales (baja un poco la temperatura por la entrada de aire para luego reavivarse), el comienzo de la fase de extinción al cerrar las puertas, en el que al poco tiempo empieza a caer la temperatura, y la fase final, cuando los bomberos acabaron de extinguirlo con agua.

### 4.3.2. Pérdidas de Propagación

Analizamos a continuación los resultados obtenidos en cuanto a las pérdidas de propagación a lo largo del ensayo, para diferentes bandas de frecuencias y anchos de banda. Las ecuaciones que hemos empleado para procesar las trazas obtenidas con el analizador de redes son las que vimos en el segundo apartado del proyecto. Para observar los efectos que el humo, la aparición del plasma y la temperatura pueden provocar, normalizamos los resultados al caso de referencia, antes de iniciar el incendio, como comentamos con anterioridad.

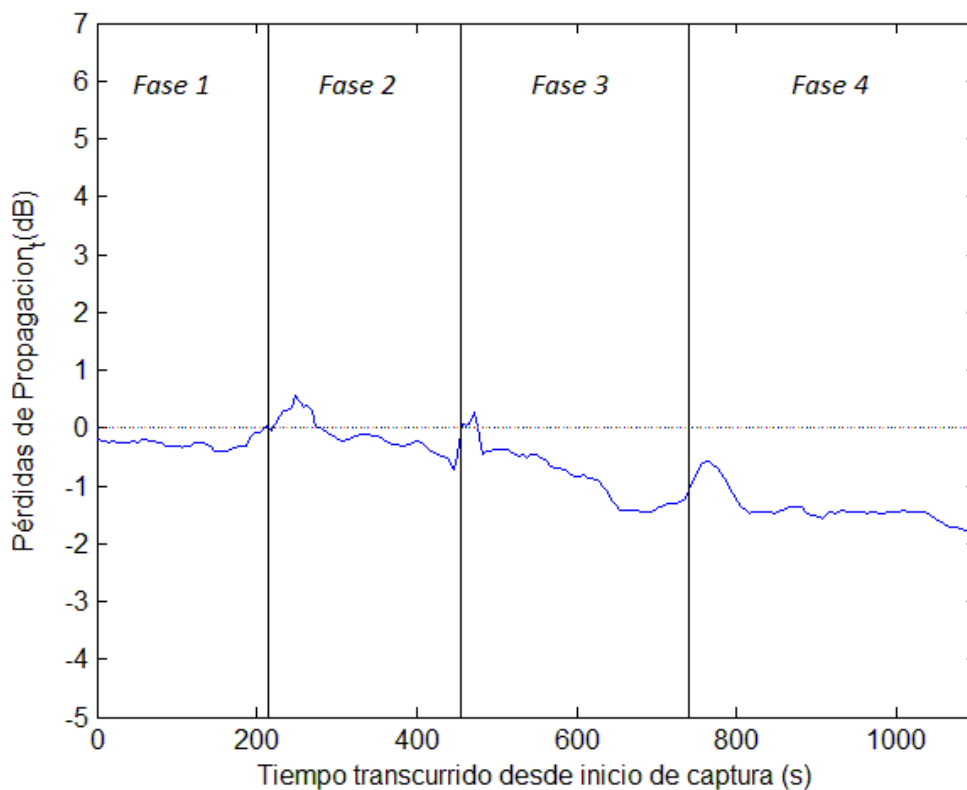


Fig.26 Pérdidas de propagación en toda la banda de UWB a lo largo del experimento

Si analizamos las pérdidas de propagación obtenidas teniendo en cuenta todo el ancho de banda (figura 26, con ancho total de 5.5 GHz centrado a 5.75 GHz), vemos que no hay apenas pérdidas de propagación adicionales y que en todo caso se mejora algo con respecto al caso de referencia, sin presencia de fuego. En la figura, en los cambios entre fases, podemos observar unos pequeños "picos" en instantes en los que aumentan las pérdidas debido a movimientos del personal para cambiar las condiciones del medio, cambios para simular las fases de un incendio real.

A partir de ahora mostraremos los resultados obtenidos para diferentes sub-bandas de frecuencias y para diferentes anchos de banda, para caracterizar el comportamiento del canal en cada una de ellas y para estudiar la influencia de la frecuencia y del ancho de banda del canal.

Si tomamos como frecuencia central la del experimento (5.75 GHz), como vemos en la figura 27, podemos observar que para cualquier ancho de banda se producen unas pérdidas prácticamente despreciables en la fase inicial del incendio, creciendo al abrir las puertas laterales. No obstante, y como veremos en el siguiente apartado, no es por abrir estas puertas por lo que aumentan las pérdidas. Podemos observar que cuando aumentamos el ancho de banda los resultados tienden a suavizarse: apenas hay pérdidas en las dos primeras fases del incendio y hay menos ganancia en las fases de extinción con respecto a anchos de banda menores.

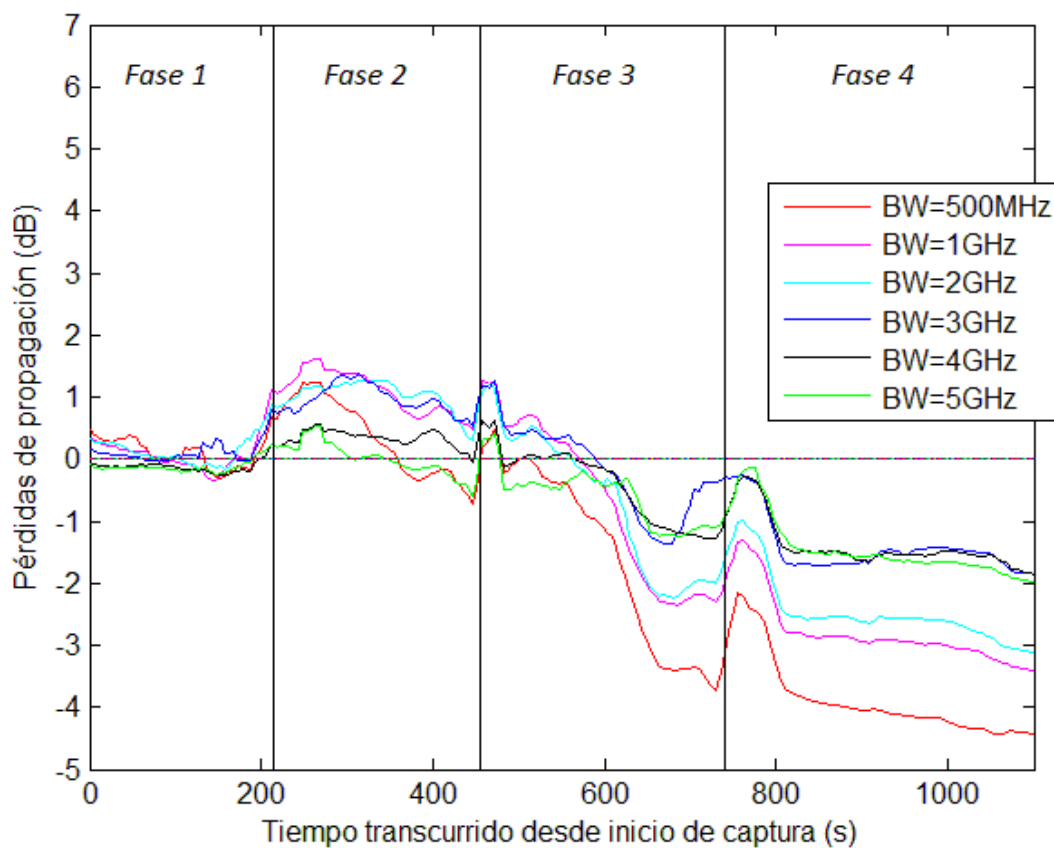


Fig.27 Pérdidas de propagación para diferentes sub-bandas centradas en  $f_c=5.75$  GHz

En las gráficas que mostramos a continuación vamos a observar cómo afectan las pérdidas de propagación para diferentes anchos de banda y frecuencias centrales. En la figura 28 veremos las pérdidas para anchos de banda de 500 MHz, en la figura 29 observaremos para anchos de 1 GHz, y en la figura 30, para 2 GHz. En cada una de las gráficas centraremos la señal en 4, 5, 6, 7 y 8 GHz.

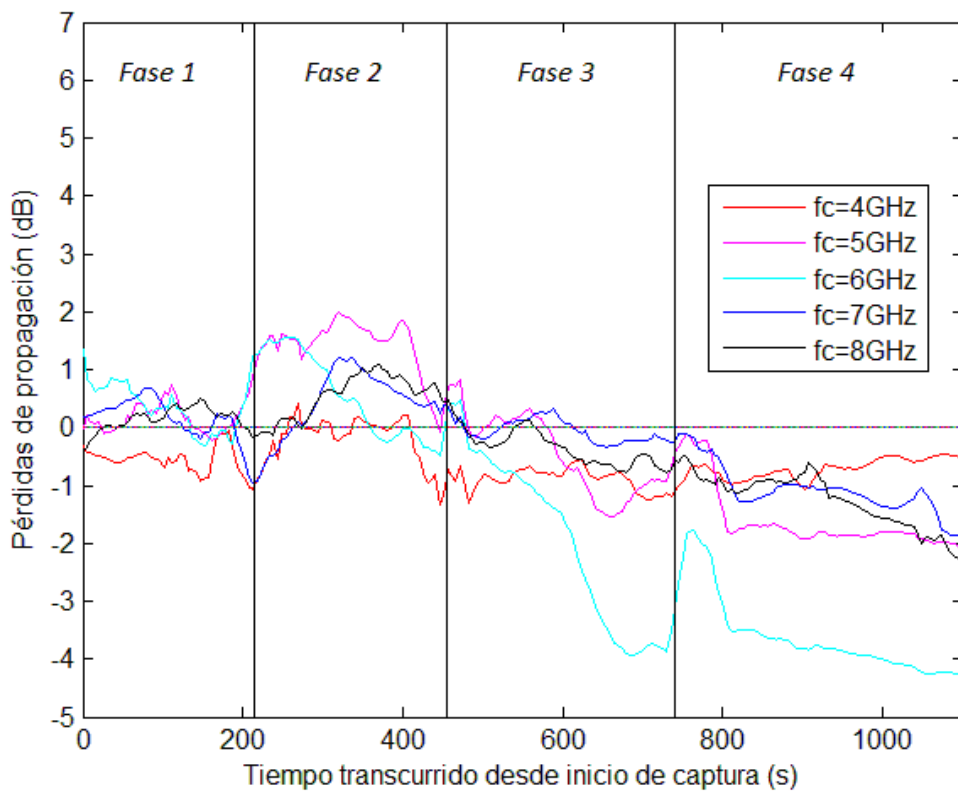


Fig.28 Pérdidas en sub-bandas con diferentes frecuencias centrales y BW=500 MHz

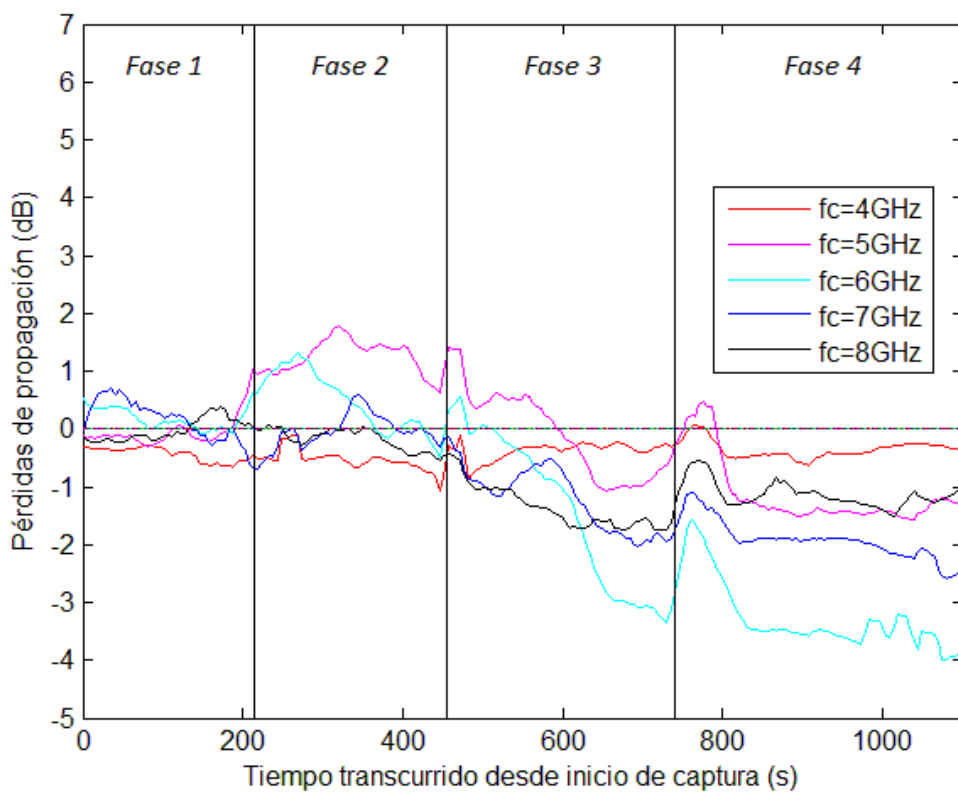


Fig.29 Pérdidas en sub-bandas con diferentes frecuencias centrales y BW=1 GHz

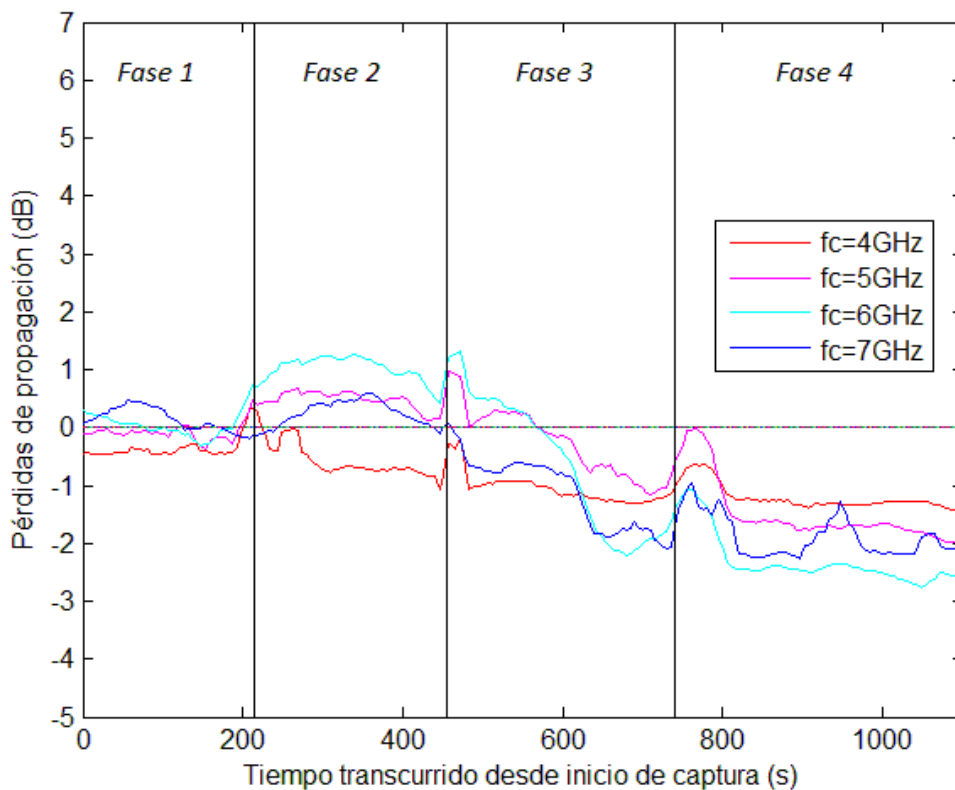


Fig.30 Pérdidas en sub-bandas con diferentes frecuencias centrales y BW=2 GHz

Observando las gráficas anteriores podemos obtener algunas conclusiones:

- Las frecuencias en las que se producen mayores pérdidas (sin sobrepasar los 2 dB respecto al caso sin fuego) están en torno a los 5 y 6 GHz, algo menos en los 7 GHz. Dichas pérdidas se concentran en la segunda fase del incendio, en la que se abrían las puertas laterales (no es debido a la apertura de dichas puertas, como veremos más adelante).
- Si tomamos bandas de frecuencias centradas a 4 u 8 GHz, las más alejadas de la frecuencia central, no se producen apenas pérdidas.
- Es también en estas frecuencias, las alejadas de la frecuencia central del ensayo, donde la ganancia en las dos fases de extinción es menor.
- Volvemos a observar que conforme aumentamos el ancho de banda de análisis los resultados tienden a suavizarse (menores pérdidas y ganancias).

Comentamos a continuación si los mecanismos de degradación anunciados han aparecido. Empezamos por comprobar si la temperatura ha afectado a la señal en la primera fase del incendio: la temperatura crece de forma rápida y continua, y sin embargo no se aprecia un aumento de las pérdidas en esa etapa. Podemos concluir que las temperaturas alcanzadas (400 °C en los termopares, en torno a los 900 °C según la cámara térmica en la pira) no han degradado la señal.

En cuanto al plasma, podemos concluir que no afecta al experimento en la banda de trabajo. Como ya explicamos, la aparición del plasma en las llamas puede afectar a las comunicaciones, pero en bandas más bajas (por debajo de los 500 MHz), a menos que haya componentes que modifiquen las características químicas del combustible.

Tampoco ha afectado la presencia del vapor de agua al extinguir el incendio, ya que no se aprecian pérdidas en esta fase del incendio. Es lógico por otra parte que así sea, puesto que los picos de absorción del vapor de agua se encuentran en bandas superiores.

En la siguiente sección veremos que el cambio en la distribución y en la altura del humo que hemos inducido al abrir las puertas laterales no ha supuesto tampoco un mecanismo de degradación, y, si aparece, está enmascarado por un factor no esperado a priori que veremos a continuación.

### 4.3.3. Potencia de la contribución principal

En las figuras 31 y 32 observamos la razón por la cual hay unas pérdidas algo mayores en la segunda fase del incendio. Si bien se pensaba que el aumento de las pérdidas en la segunda fase podía ser causado por un cambio en la distribución y/o en la altura del humo, vemos que puede deberse a un cambio en la potencia de la contribución principal, que será típicamente la del rayo directo.



Fig.31 Fase del incendio inicial, con LOS



Fig.32 Fase intermedia, con NLOS

Como podemos observar, las condiciones de visión del rayo directo han variado a lo largo del ensayo, y al pasar a condiciones NLOS (segundo 200 aprox.) aparecen unas pérdidas en el rayo directo a tener en consideración. En la secuencia de vídeo se aprecia que, si bien casi coincide con la apertura de las puertas laterales (segunda fase), la pérdida de parte de la potencia parece causada más por el cambio a NLOS que por un cambio en la densidad o la altura del humo. Más adelante, conforme se quema la pira de combustible, se recupera la condición de LOS. En las figuras 33 y 34 vemos en el PDP de toda la banda lo que le ha ocurrido a las contribuciones más importantes, cogiendo como muestras una traza en condiciones LOS y otra de condiciones NLOS.

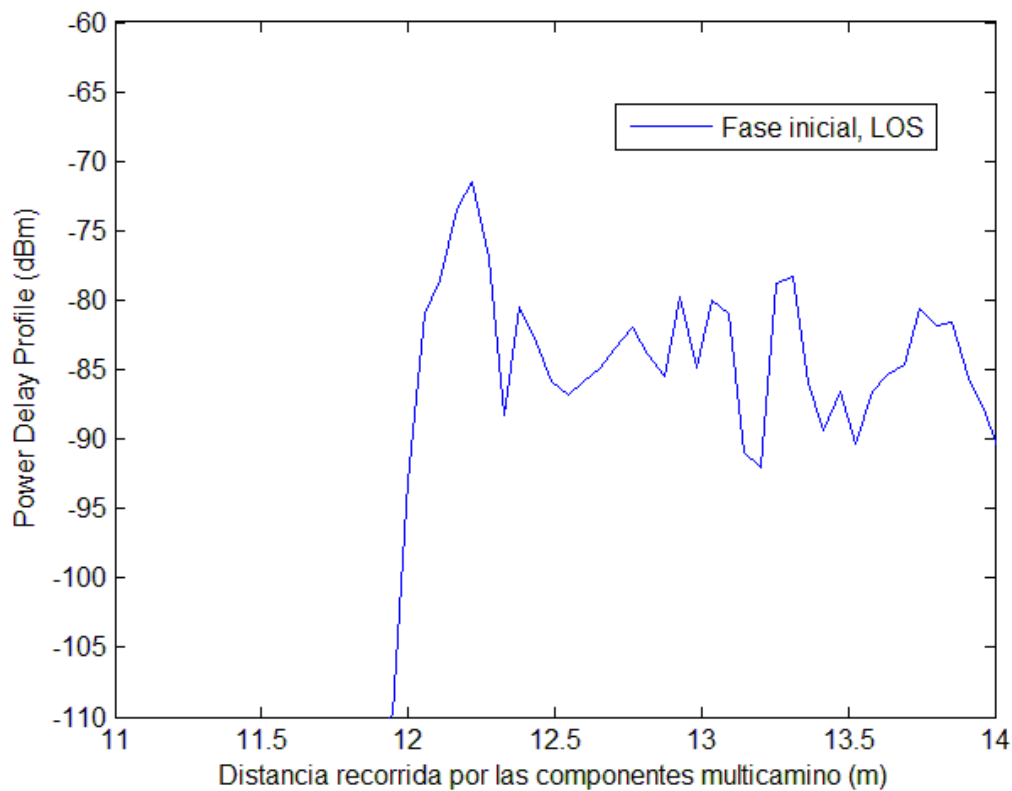
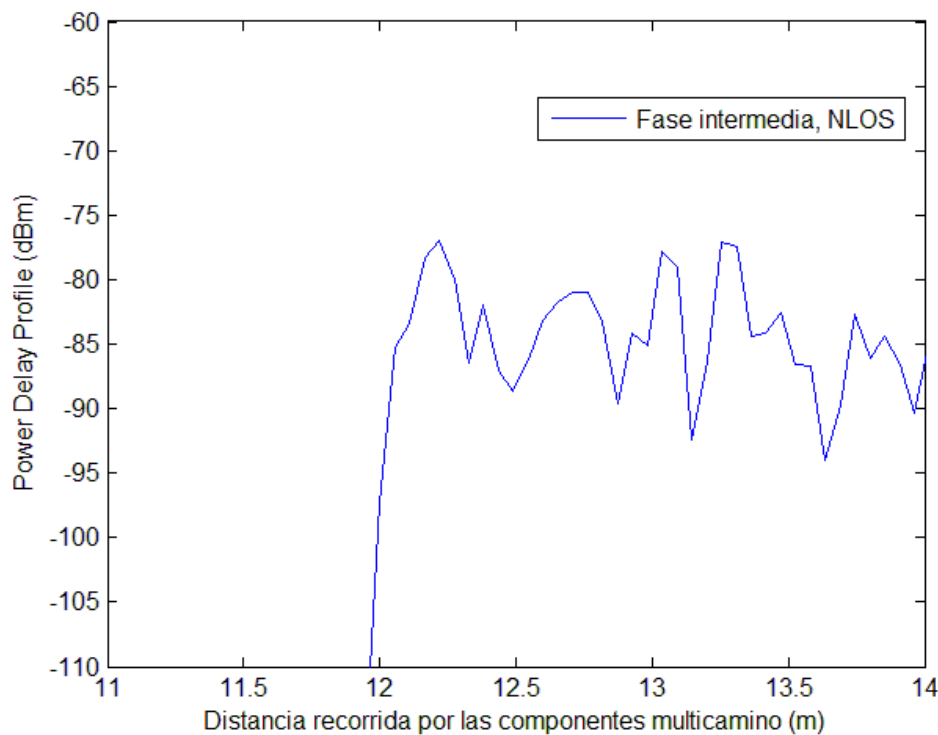


Fig.33 PDP en condiciones LOS



**Fig.34 PDP en condiciones NLOS**

Si se analiza la secuencia de vídeo capturada por la cámara térmica se puede apreciar que llega un momento en el que se recupera la condición LOS, y se corresponde con el intervalo entre la traza 107 y la 115 del análisis, esto es, en torno al segundo 600 (10 minutos) del experimento, y en la sección anterior se puede comprobar que hay un cambio en la tendencia de las pérdidas en esa fase, pasando a haber ganancia respecto al caso de referencia.

#### 4.3.4. Otros parámetros

Una vez hemos visto cómo afectan las características del canal al rayo directo y a las pérdidas de propagación que se producen en el mismo (mediante las cuales vimos la afectación de los mecanismos de degradación), vamos a terminar caracterizando el canal con unas medidas de dispersión y de ancho de banda de coherencia, apoyándonos en la teoría y en formulación que estudiamos en el segundo capítulo.

Como podemos comprobar en la figura 35, el RMS Delay spread se comporta de forma constante entorno a los 86 ns. Es habitual en entornos indoor que dicho parámetro no supere los 100 ns. También es lógico que el valor sea poco fluctuante puesto que las rutas de rayos apenas varían a lo largo del experimento. Destacar que el valor es relativamente alto porque las medidas se realizaron en una caja metálica, donde se producen muchas reflexiones y el rayo pierde poca potencia al ser la reflexión el fenómeno predominante.



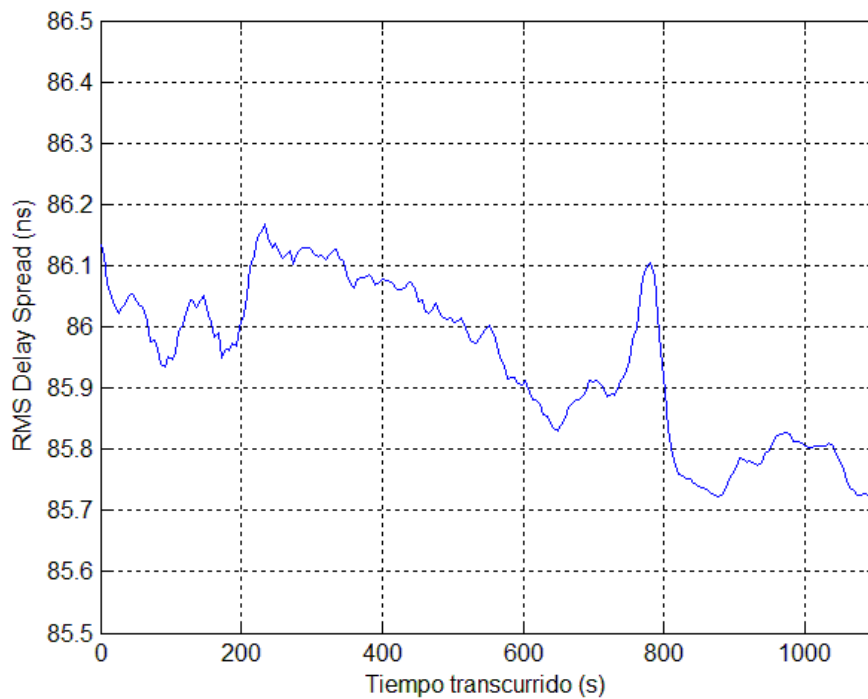


Fig.35 RMS Delay Spread del canal

En cuanto al ancho de banda de coherencia, se sitúa en torno a los 20 MHz durante el ensayo. No es un valor muy elevado puesto que las componentes multicamino que se producen en el interior del contenedor, al ser metálico, tienen una potencia considerable con respecto a la del rayo directo. Podemos ver el ancho de banda de coherencia en la figura 36.

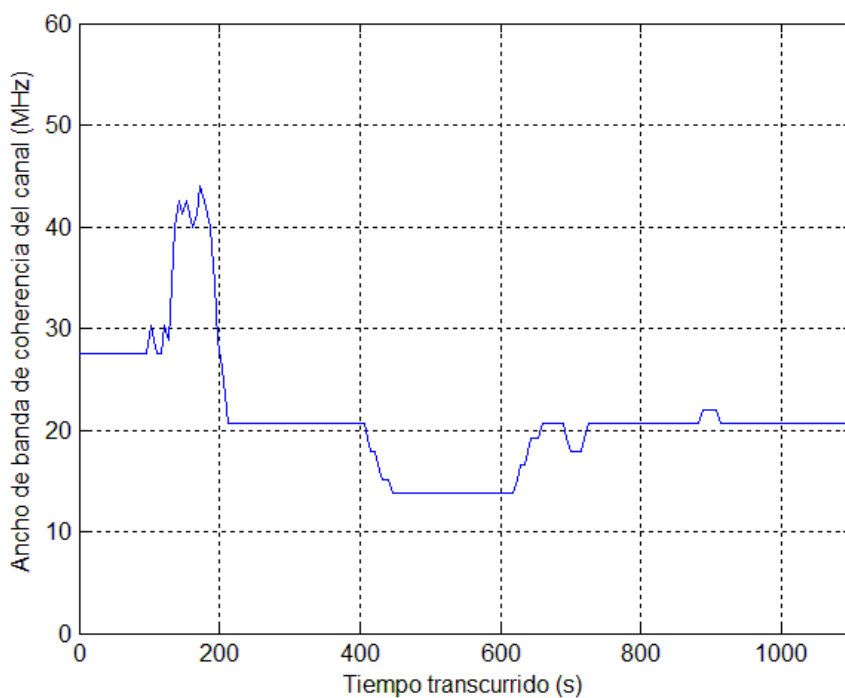


Fig.36 Ancho de banda de coherencia del canal



# Capítulo 5:

## Caracterización del canal radio en BAN

En este apartado analizaremos en profundidad el comportamiento del canal radio en redes de área corporal de tipo intracorporal, en concreto tomando el tejido muscular humano como medio a estudiar. Para la realización de cada uno de los experimentos, se enunciarán los elementos empleados, se explicará cómo se dispusieron dichos elementos y cómo se hicieron las medidas. Posteriormente se expondrán y comentarán los resultados obtenidos.

Cada uno de los experimentos tuvo una configuración algo diferente, como veremos en los siguientes apartados, pero emplearon un gran número de elementos comunes: un portátil externo junto al USB de tipo A-B para controlar el VNA, el propio analizador, un par de cables coaxiales de un metro de longitud, un par de antenas, elementos de fijación, elementos de protección en caso necesario para las antenas que deban sumergirse y una solución acuosa que simulará el comportamiento dieléctrico del tejido muscular. Esta solución simulará en concreto la permitividad relativa [26], cuya fórmula vemos en la ecuación (19), solución que de aquí en adelante denominaremos "phantom".

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (19)$$

Los tejidos humanos se clasifican electromagnéticamente en dos categorías: aquellos que tienen un alto contenido en agua (como la piel, los músculos, los órganos internos, el cerebro) y los que tienen bajo contenido en agua (como los huesos y el pelo). Los phantoms que preparamos son de la primera categoría, con alto contenido en agua. Se caracterizan por tener una constante dieléctrica  $\epsilon'$  de entre 30-60 y un factor de pérdidas  $\epsilon''$  de entre 15-25 para las frecuencias en las que trabajamos [26], pues hay que tener en cuenta que los valores de permitividad son diferentes para cada frecuencia, por lo que habrá que crear dos phantoms diferentes, uno para caracterizar el canal UWB y otro para estudiar la banda ISM.

Actualmente el campo de estudio referente a BAN está siendo bastante desarrollado: se han desarrollado modelos para caracterizar dieléctricamente los tejidos humanos a diferentes frecuencias a partir de la expresión de Cole-Cole [27], [28], con la ayuda de dichos modelos se están creando phantoms que simulan las características de dichos tejidos para una determinada banda de frecuencias [26], [29], y se están creando antenas tanto para la banda ISM como para UWB para trabajar con sistemas BAN [2], [30].

En lo referente a la caracterización del canal radio en redes de área corporal, comentar que vamos a estudiar tres casos diferentes:

- Caso In-Body to In-Body (IB2IB), situación en la que ambas antenas están situadas en el interior del phantom.
- Caso In-Body to On-Body (IB2OB), en la que una antena se mantiene en el interior del phantom mientras que la otra se sitúa sobre o pegado al contenedor del phantom.
- Caso In-Body to Off-Body (IB2OFF), también con una antena en el interior del phantom y la otra fuera del contenedor, pero a cierta distancia del mismo y no sobre o pegado a él como en el caso anterior.

Si bien ya existen algunos trabajos que caracterizan el caso de IB2IB, como un estudio teórico en la banda de 1 a 6 GHz [31] y otro para la banda ISM ya con pruebas en phantom [2], en este trabajo realizamos una serie de medidas también en phantoms estudiando un mayor número de casos, no únicamente IB2IB, y tanto para sub-bandas de ISM como de UWB.

## 5.1. Phantom de simulación

Como hemos comentado, los phantoms creados, tanto para UWB como para la banda ISM, son muy útiles para simular el canal radio y comprobar el funcionamiento de las antenas cuando transmitimos traspasando un determinado tejido humano. Existen diversos estudios en los que se han empezado a desarrollar distintos tipos de phantoms que simulan la permitividad compleja relativa de una parte del cuerpo, ya sean phantoms líquidos, semi-líquidos y sólidos con diversos materiales.

Los phantoms empleados en este trabajo fueron desarrollados en el Centro de Biomateriales e Ingeniería Tisular (CBIT), centro situado en la Ciudad Politécnica de la Innovación (CPI) de la UPV. Nuestro phantom en concreto fue desarrollado para simular las características electromagnéticas de un músculo humano. Los valores de permitividad para el músculo están disponibles y los podemos obtener directamente desde una aplicación web [32]. En la tabla 2 tenemos representados los valores de permitividad relativa correspondientes a la primera y la última frecuencia de las bandas a estudiar.

Frecuencia	Constante dieléctrica $\epsilon'$
2.36 GHz (ISM)	52.84
2.5 GHz (ISM)	52.668
3.1 GHz (UWB)	51.936
8.5 GHz (UWB)	44.811

**Tabla 2. Valores límites de permitividad del músculo humano en las bandas de estudio**

El preparado que realizamos para UWB [26] consiste en una solución acuosa de azúcar, en concreto de 1 mol de azúcar por cada litro de agua destilada (que equivale a 342 gramos de azúcar por cada litro de agua, en total se emplearon 10 litros).

Antes de comenzar se pesó mediante una balanza de precisión del laboratorio el azúcar necesario para realizar la mezcla, 3.420 kilogramos. La mezcla se iba disolviendo en pasos de un litro con la ayuda de una jarra medidora y se introducía en un matraz como el que vemos en la figura 37 para comprobar que el volumen de la disolución era el correcto. Una vez la solución estaba disuelta correctamente se introducía en el interior de un recipiente de plástico que posteriormente fue sellado para transportarlo al laboratorio de comunicaciones móviles en el cual se realizaron las medidas.

El phantom desarrollado específicamente para ISM añadía cloruro sódico a la solución para simular el comportamiento electromagnético del músculo humano en la banda médica [30]. En este caso, la componente del agua destilada es del 59.5%, mientras que el 40% es azúcar y el 0.5% es cloruro sódico (que equivale a 5 gramos, pues la solución era de 10 litros también en este caso). Este phantom se elaboró siguiendo el mismo procedimiento que en el caso de UWB.



Fig.37 Matraz del laboratorio empleado

En la banda de ISM, tomando como frecuencia central la de la banda, el valor de permitividad relativa del músculo humano se sitúa en torno a 52.76. Se realizaron unas medidas en el instituto ITACA, cuyo centro está situado también en la CPI, para comprobar que el valor de permitividad de una muestra de nuestro phantom no difiere mucho del valor real. Para ello, se empleó un equipo (figura 38) que consiste en una cavidad resonante que nos devuelve directamente el valor de permitividad. El valor de constante dieléctrica obtenido fue de 56.2, algo distante pero válido para emular el músculo humano en la banda de ISM.



Fig.38 Equipo de medida de permitividad relativa [33]

## 5.2. Caso In-Body to In-Body

En este apartado analizamos el comportamiento del canal radio en una red de área corporal en la que las antenas se encuentran ambas en el interior del cuerpo, el caso de In-Body to In-Body (IB2IB). Como explicamos anteriormente, emulamos el comportamiento del músculo humano mediante un phantom específicamente preparado para las bandas de trabajo, que son las bandas ISM y UWB.

Consideramos el medio de tipo WSSUS (estacionario en sentido amplio y con retardos incorrelados), homogéneo y al haber una atenuación extremadamente elevada, la contribución del rayo directo es mucho más significativa que las demás. No se produce scattering puesto que el phantom es una simulación sintética y homogénea sin elementos que puedan provocar reflexiones, difracciones, etc.

### 5.2.1. Disposición del experimento

El setup de medida lo podemos observar en la figura 39. El analizador de redes vectorial estaba colocado en un soporte de madera equipado con ruedas que facilitaba su transporte por el laboratorio. Conectado a él mediante un cable USB de tipo A-B estaba el portátil desde el cual se configuró y controló el VNA.

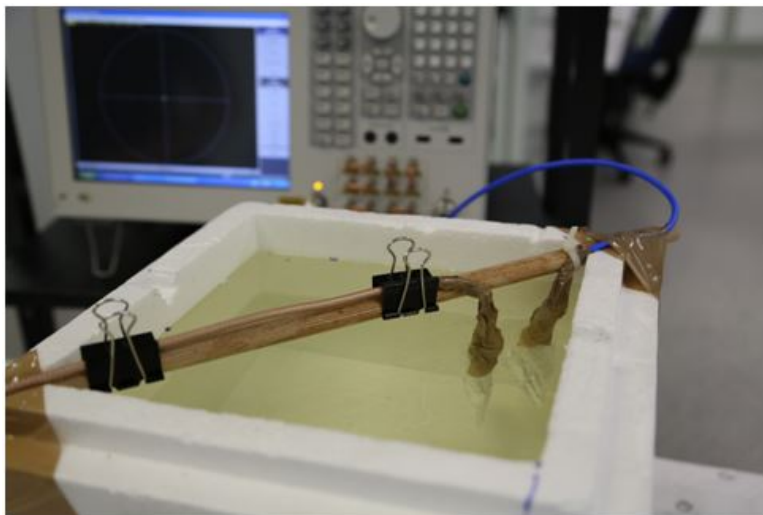


Fig.39 Disposición del experimento de In-Body to In-Body

En la mesa de trabajo estaba el phantom dentro de una caja de poliestireno. Dos cables coaxiales de un metro de longitud estaban conectados desde los puertos del VNA a cada una de las antenas. Para mantener rígidos estos cables se emplearon un par de pinzas como podemos ver en la figura 39. En este caso las antenas, ya sean las del estudio de la banda ISM o las UWB, fueron ambas sumergidas en el phantom.

Las antenas colgaban desde un listón cilíndrico de madera colocado en el diagonal de la caja cuyos extremos están fijados gracias a una muesca realizada en la misma y a cinta adhesiva. Para colocar de forma perpendicular las antenas nos hemos ayudado, además del palo mencionado, de cinta adhesiva y de bridas. Para no ensuciar en exceso la mesa de trabajo se colocó un rollo de papel, ya que el líquido del phantom era muy pegajoso.

5.2.2. UWB

Tanto en este caso como en los que veremos de aquí en adelante se siguió el procedimiento de medida expuesto en el apartado 3.3 del documento. En la tabla 3 podemos observar los parámetros de configuración empleados, así como el tipo de antena utilizado en el caso y el nivel de ruido con el que trabajamos. Mencionar que las antenas fueron sumergidas a una profundidad de 8 cm en el phantom en todos los casos que estudiamos.

Número de Puntos del VNA	20001
Banda de Frecuencias	3.1GHz a 8.5 GHz
Ancho de banda de resolución	3 kHz
Potencia de transmisión	10 dBm
Tipo de Antenas	Parche - Parche (fig. 8)
Nivel de ruido	-110 dBm

Tabla 3. Configuración del equipo, antena empleada y nivel de ruido para IB2IB en UWB

Las medidas de transmisión del canal se realizaron para diferentes separaciones de antenas, de 40 a 130 mm en pasos de 10 mm, como podemos observar en la figura 40. Una vez tenemos el equipo configurado, el sistema calibrado y las antenas funcionando, se procedió a medir. Para cada una de las distancias se obtuvieron un total de cinco capturas, mejorando gracias a ello la SNR en post-procesado al combinarlas y protegiéndonos frente a fallos puntuales.

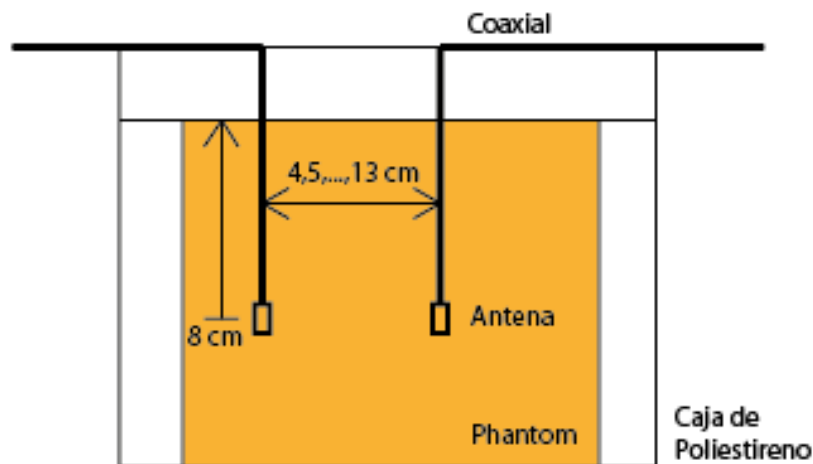


Fig.40 Esquema de mediciones para IB2IB en UWB



5.2.2.1. Resultados

En la figura 41 se representa la respuesta en frecuencia del canal,  $H(f)$ , en función de la separación entre las antenas. Podemos observar claramente que, para una separación entre antenas dada, la potencia recibida decae de forma muy pronunciada con el incremento de frecuencia, en el orden de 9 dB/GHz.

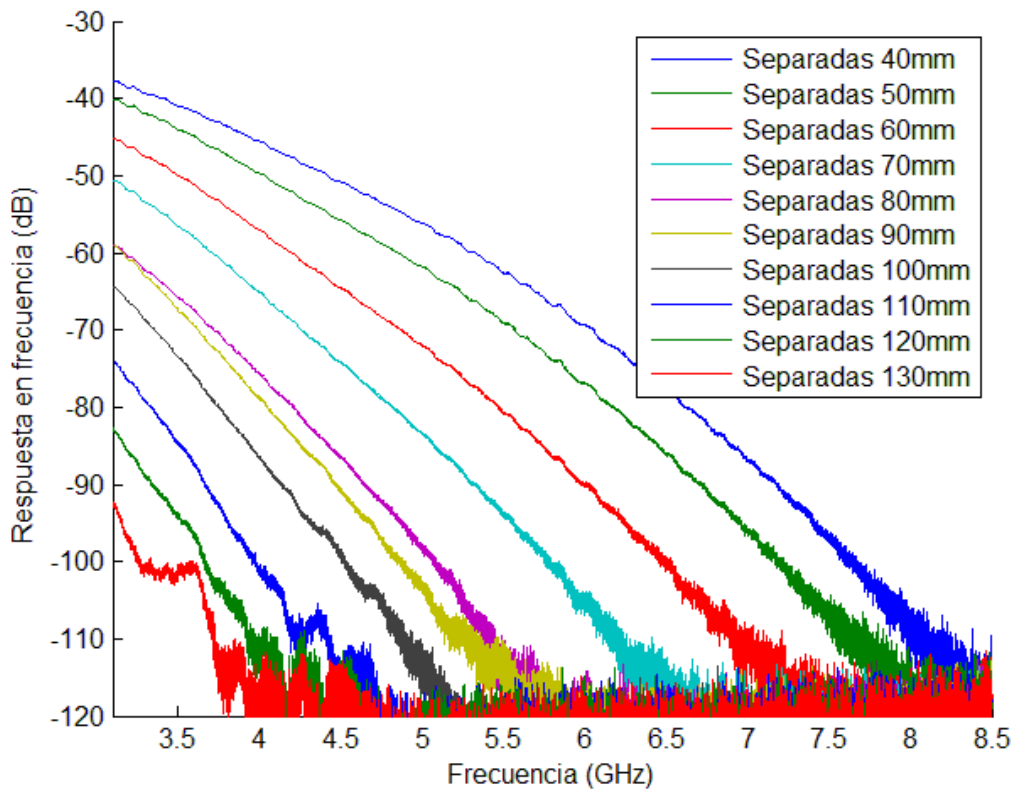


Fig.41 Respuesta en frecuencia de IB2IB en UWB

Podemos comprobar también que el hecho de aumentar la separación entre las antenas provoca una disminución muy acusada de la señal (aumentar un centímetro dicha separación provoca un aumento de las pérdidas de aproximadamente 6 dB). Además, cuanto mayor es la separación entre las antenas también es más pronunciada la pendiente de decremento de la potencia recibida. Ilustramos esto en la tabla 4.

	Potencia a 3.1 GHz	Potencia a 4.1 GHz	Caída de Potencia
Separación: 40 mm	-37.8 dB	-46.7 dB	8.9 dB
Separación: 90 mm	-58.9 dB	-81.2 dB	22.3 dB

Tabla 4. Aumento de la pendiente de pérdidas al incrementar la separación entre antenas

En la figura 42 pasamos a observar el incremento de pérdidas conforme a medida que separamos las antenas. Vemos que para las diferentes separaciones tenemos un punto de ruptura a partir del cual el valor de pérdidas se estabiliza. Esto es debido a que los puntos por debajo del nivel de ruido (-110 dBm) no son tenidos en cuenta.

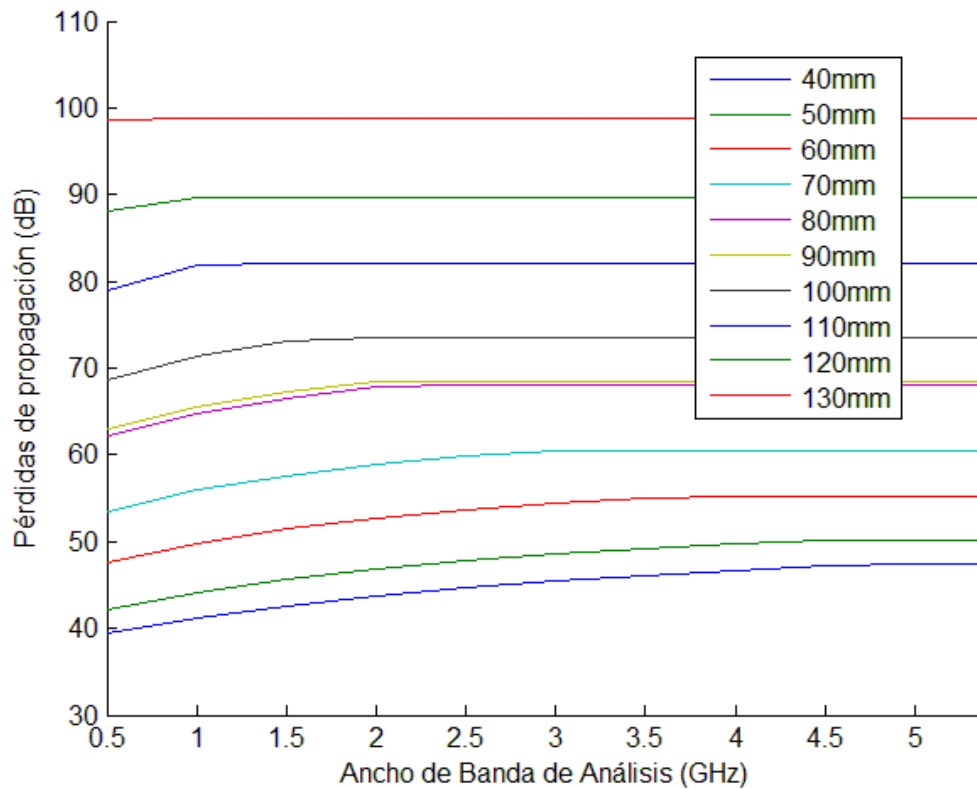


Fig.42 Pérdidas de propagación de IB2IB al aumentar el ancho de banda de trabajo en UWB

Esta apreciación es muy importante puesto que nos indica con cuánto ancho de banda podemos trabajar en función de la separación que tengamos entre las antenas. Evidentemente este “break point” se produce en anchos de banda cada vez más pequeños conforme aumentamos dicha separación. Por ejemplo, para una separación de 40 mm podremos transmitir en una banda muy grande, de casi 5 GHz, mientras que si la separación es de por ejemplo 100 mm no podremos apenas emplear un ancho de 2 GHz, además con pérdidas mucho mayores.

Comentar que no se aprecia un aumento muy elevado de las pérdidas en la gráfica con el aumento del ancho de banda. Esto se debe a la naturaleza de las unidades logarítmicas. Así pues, si por ejemplo nos fijamos en una separación entre antenas de 40 mm podemos observar que el aumento de las pérdidas ha sido de 7.5 dB, esto es, en unidades lineales, de unas pérdidas casi 9 veces mayores en un ancho de banda de 4.5 GHz con respecto a un ancho de 500 MHz.

En la figura 43 mostramos las pérdidas de propagación en función de la separación entre antenas para diferentes sub-bandas de 500 MHz del espectro de UWB. Podemos observar que perdemos unos 5 dB entre cada sub-banda. La parte baja del espectro de UWB es adecuada para transmisiones en distancias más largas, debido a su menor nivel de pérdidas, mientras que la parte más alta del espectro de UWB puede ser empleada en transmisiones entre distancias cortas, facilitando la miniaturización de las antenas para su posible implementación.

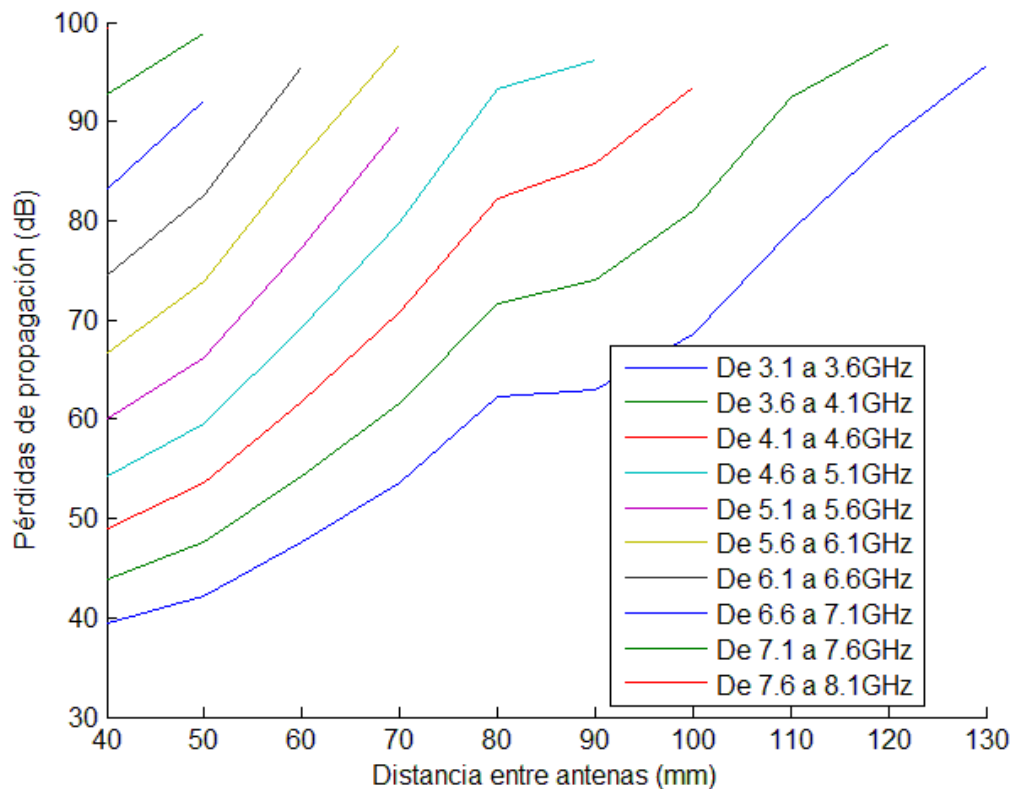


Fig.43 Pérdidas de propagación de IB2IB en bandas de UWB

En cualquier caso, es importante elegir sub-bandas que nos permitan trabajar en aplicaciones IB2IB para cualquier valor de la separación de antenas y que nos permitan aprovechar el máximo ancho de banda posible. Vemos que las tres sub-bandas más bajas de frecuencia son las más adecuadas para ello (son las sub-bandas de 3.1-3.6 GHz, 3.6-4.1 GHz y 4.1-4.6 GHz).

La figura 44 es la resultante de tomar la sub-banda de UWB de 3.1 GHz a 4.8 GHz. Escogemos esta banda para poder comparar resultados entre los casos de IB2IB, IB2OB e IB2OFF ya que algunas de las antenas que intervienen tienen su frecuencia máxima de trabajo fijada a 4.8 GHz como se verá en las siguientes secciones. En dicha gráfica podemos observar las pérdidas de propagación para cada una de las distancias entre antenas.

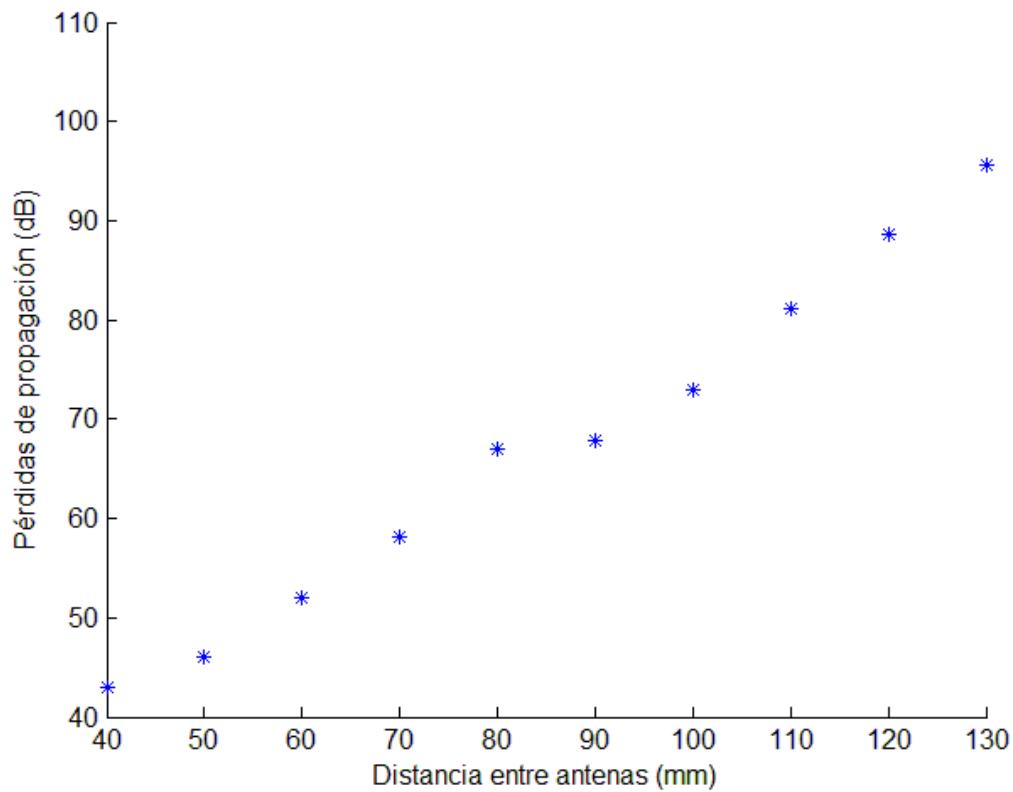


Fig.44 Pérdidas de propagación de IB2IB de 3.1 a 4.8 GHz

A partir de estos puntos tratamos de obtener un modelo que refleje el comportamiento del canal. Emplearemos un modelo lineal como el que vemos en la ecuación (20), ya que las pérdidas exhiben un comportamiento lineal con la distancia (también lineal). La distancia se introducirá en la ecuación en milímetros.

$$L_{prop}(d)|_{dB} = L0 + \alpha d \quad (20)$$

Los coeficientes obtenidos para modelar el comportamiento del canal se muestran en la tabla 5, mientras que en la figura 45 representamos los puntos obtenidos de pérdidas de propagación conjuntamente con la función de modelado.

<b><math>L0</math> (dB)</b>	<b>16,463</b>
<b><math>\alpha</math> (dB/mm)</b>	<b>0,61</b>

Tabla 5. Coeficientes del modelo lineal para IB2IB en UWB

El parámetro  $\alpha$  nos cuantifica la hostilidad del canal, muestra que de media se pierden 6.1 dB de potencia con cada centímetro que separamos las antenas.

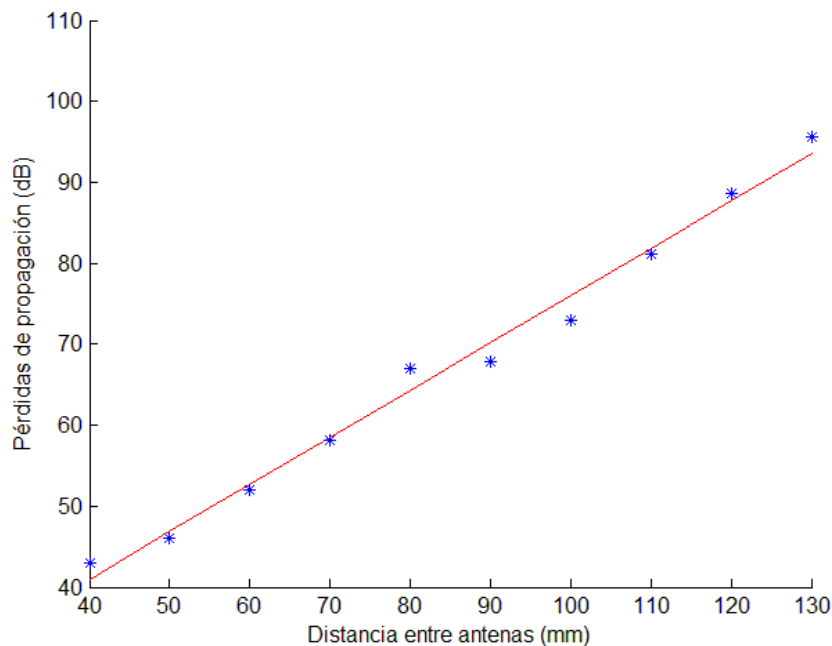


Fig.45 Pérdidas de propagación de IB2IB de 3.1 a 4.8GHz con modelo lineal

### 5.2.3. Banda ISM

En la tabla 6 podemos observar los parámetros de configuración empleados, así como el tipo de antena utilizado y el nivel de ruido con el que trabajamos.

Número de Puntos del VNA	20001
Banda de Frecuencias	2.36 GHz a 2.5 GHz
Ancho de banda de resolución	3 kHz
Potencia de transmisión	5 dBm
Tipo de Antenas	Dipolo - Dipolo (fig. 11)
Nivel de ruido	-110 dBm

Tabla 6. Configuración del equipo, antena empleada y nivel de ruido para IB2IB en ISM

De nuevo medimos el parámetro de transmisión para diferentes distancias entre antenas, partiendo de una separación mínima de 20 mm aumentando dicha separación en pasos de 10 mm hasta 130 mm, a partir del cual ya alcanzamos el nivel de ruido. Para cada una de las distancias obtuvimos de nuevo un total de cinco capturas, del mismo modo y por los mismos motivos por los que lo hicimos en el caso de UWB.

5.2.3.1. Resultados

En la figura 46 observamos la respuesta en frecuencia del canal,  $H(f)$ . A diferencia del caso de UWB, aquí apenas se aprecia una caída conforme aumentamos en frecuencia puesto que la banda de análisis es relativamente pequeña. Sí que podemos observar una disminución muy acusada de la señal cuando aumentamos la separación entre las antenas: en este medio, aumentar un centímetro la separación entre antenas puede provocar una atenuación de unos 7 dB.

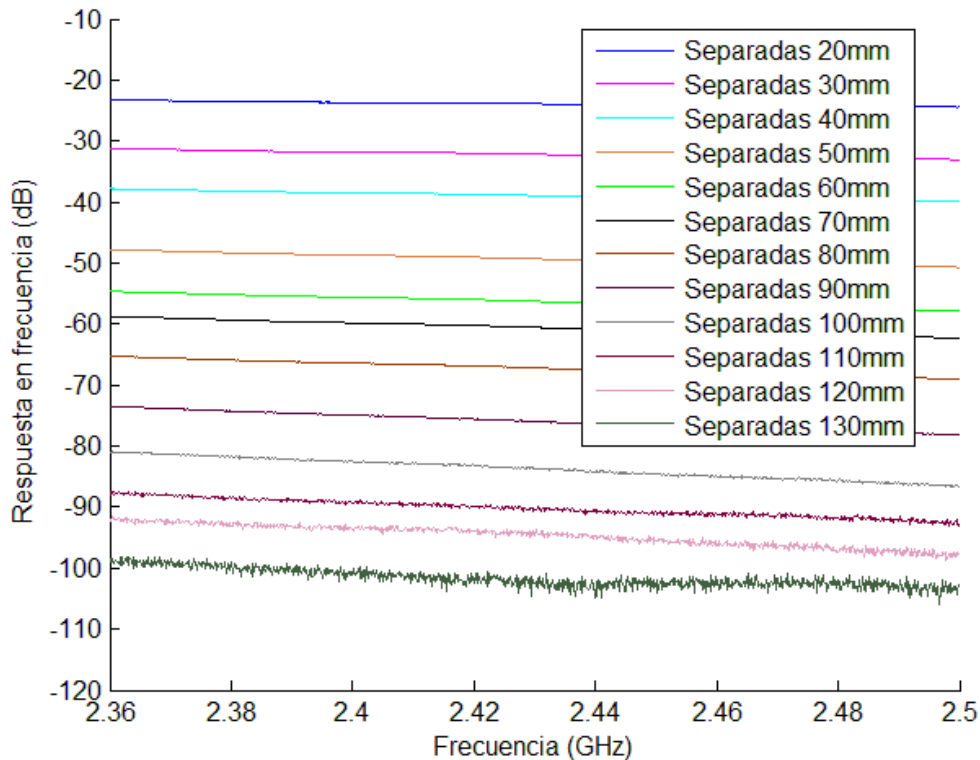


Fig.46 Respuesta en frecuencia de IB2IB en ISM

El factor negativo de emplear la banda de ISM frente a UWB es el ancho de banda disponible, que es mucho menor. No obstante, supone una mejora con respecto a las frecuencias que se emplean actualmente (la banda MICS, 402-405 MHz, que ya introdujimos en el primer capítulo), tanto en cuanto a ancho de banda como en el tamaño de las antenas.

En la gráfica 47 podemos observar las pérdidas de propagación en función de la separación entre antenas en dos sub-bandas licenciadas del espectro de ISM: la sub-banda de 2.36 a 2.4 GHz y la de 2.4 a 2.5 GHz. Las pérdidas son prácticamente idénticas, al estar en frecuencias contiguas y no tener un ancho muy elevado. Ambas sub-bandas nos permiten trabajar con separaciones de antenas superiores a los 12 cm.

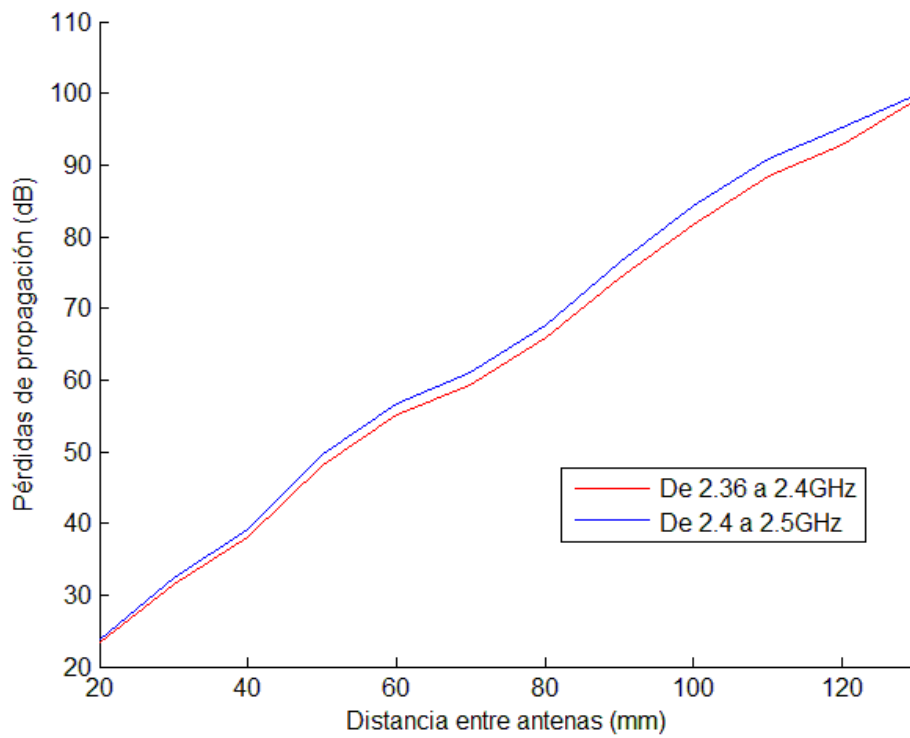


Fig.47 Pérdidas de propagación de IB2IB en sub-bandas de ISM

En la figura 48 podemos ver los las pérdidas de propagación para cada una de las distancias entre antenas analizando todas las frecuencias de la banda ISM, de 2.36 a 2.5 GHz.

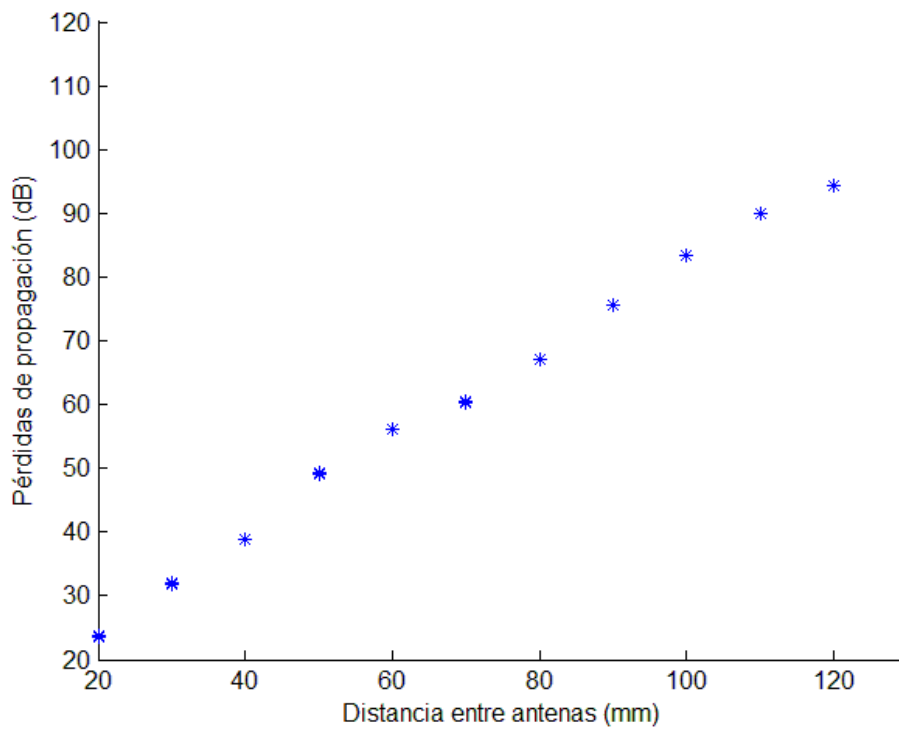


Fig.48 Pérdidas de propagación de IB2IB en ISM

A partir de estos valores tratamos de obtener un modelo que refleje el comportamiento del canal. Nuevamente, emplearemos un modelo lineal, usando la misma ecuación (20) que en el caso de UWB. La distancia en dicha ecuación se introducirá en milímetros.

Los coeficientes obtenidos para modelar el comportamiento del canal se muestran en la tabla 7, y en la figura 49 representamos los puntos obtenidos de pérdidas de propagación conjuntamente con la función de modelado.

<b><math>L_0</math> (dB)</b>	<b>11,9747</b>
<b><math>\alpha</math> (dB/mm)</b>	<b>0,697</b>

Tabla 7. Coeficientes del modelo lineal para IB2IB en ISM

En esta banda también se aprecia la hostilidad del canal, perdiendo en este caso casi 7 dB de potencia con cada centímetro que separamos las antenas. Los resultados son muy similares a los obtenidos en el caso de UWB.

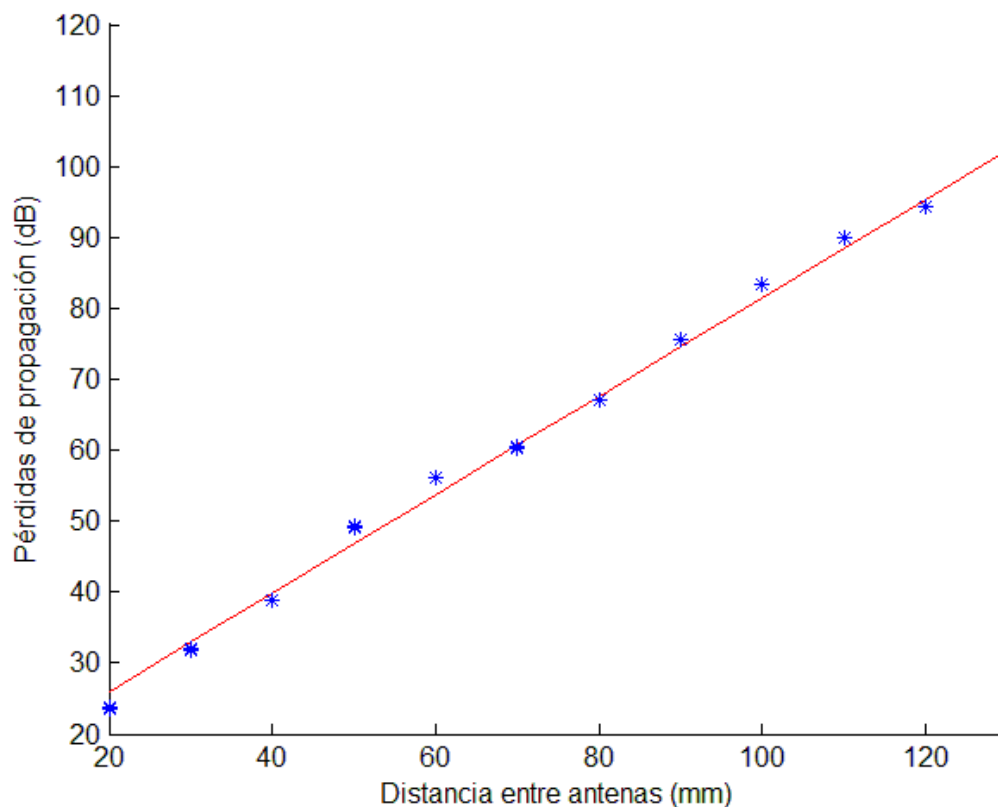


Fig.49 Pérdidas de propagación de IB2IB en ISM con modelo lineal



### 5.3. Caso In-Body to On-Body

En este apartado analizaremos el comportamiento del canal radio en una red de área corporal, pero en este caso sólo una de las antenas se encontrará en el interior del phantom mientras que la otra se ubicará junto al cuerpo (contenedor), sin separación: el caso In-Body to On-Body (IB2OB) que enunciamos anteriormente. Emularemos el comportamiento del músculo humano mediante los mismos phantoms (el de UWB y el de ISM) que empleamos en el caso de IB2IB, aunque como veremos la disposición del experimento así como los resultados cambiarán ligeramente. Consideraremos el medio WSSUS y casi homogéneo, y al haber una atenuación extremadamente elevada y muy poco espacio de aire (en la caja del phantom) la contribución del rayo directo es mucho más significativa que las demás.

#### 5.3.1. Disposición del experimento

Las medidas de In-Body to On-Body son las que han tenido más variantes: además de la medida de la banda ISM, en el caso de UWB tenemos tres tipos de experimentos, con diferentes combinaciones de antenas. Se emplearon diferentes antenas en este caso para ver el efecto de diferentes antenas en el canal.

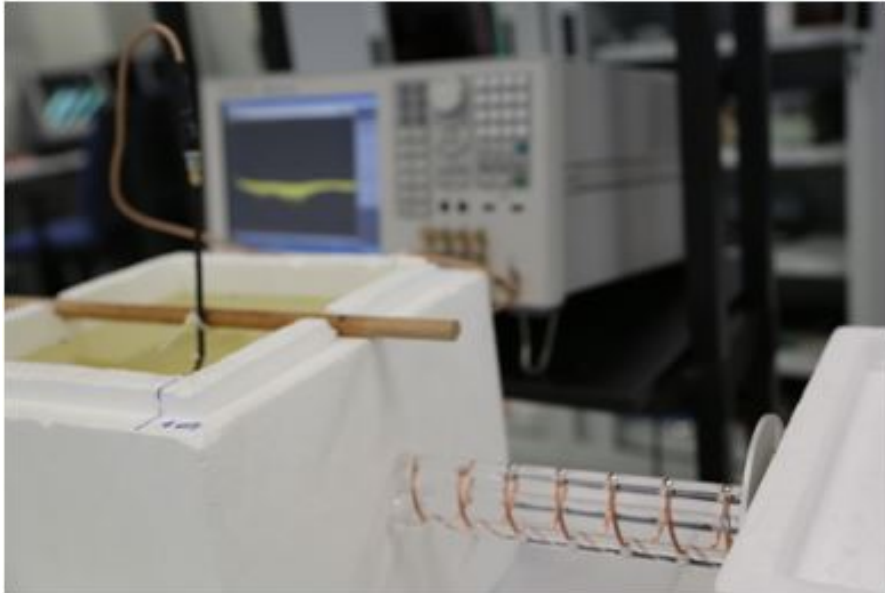


Fig.50 Disposición del experimento de In-Body to On-Body

En este caso la segunda antena es exterior, con el objetivo de simular la condición de On-Body, y este hecho facilita su colocación y evita la necesidad de protegerla en ningún caso. Podemos observar la colocación de las antenas tal y como se observa en la figura 50.

5.3.2. UWB

Se realizaron tres tandas de experimentos, cada una de ellas con una configuración diferente de antenas. En la tabla 8 podemos observar los parámetros de configuración empleados, así como el tipo de antena utilizado en el caso y el nivel de ruido con el que trabajamos.

Número de Puntos del VNA	20001
Banda de Frecuencias	3.1 GHz a 8.5 GHz
Ancho de banda de resolución	3 kHz
Potencia de transmisión	10 dBm
Tipo de Antenas	Parche - Parche (fig. 8, interior protegida) Parche (protegida) - Hélice UWB (fig. 10) Implantable (fig. 9) - Hélice UWB
Nivel de ruido	-100 dBm

Tabla 8. Configuración del equipo, antena empleada y nivel de ruido para IB2OB en UWB

En todas las tandas se realizaron medidas del parámetro de transmisión (S21) con diferentes separaciones entre las antenas, partiendo de una separación mínima entre la antena interior hasta la caja de 10 mm, aumentando dicha separación en pasos de 10 mm hasta 60 mm, a partir del cual empiezan a aparecer efectos no deseados en la respuesta del canal (probablemente debido a acoplamientos). Hay que tener en cuenta que el grosor de la caja de poliestireno es de 40 mm, por lo que las antenas estarán separadas inicialmente 50 mm, con 10 de esos milímetros de phantom tal y como se muestra en la figura 51.

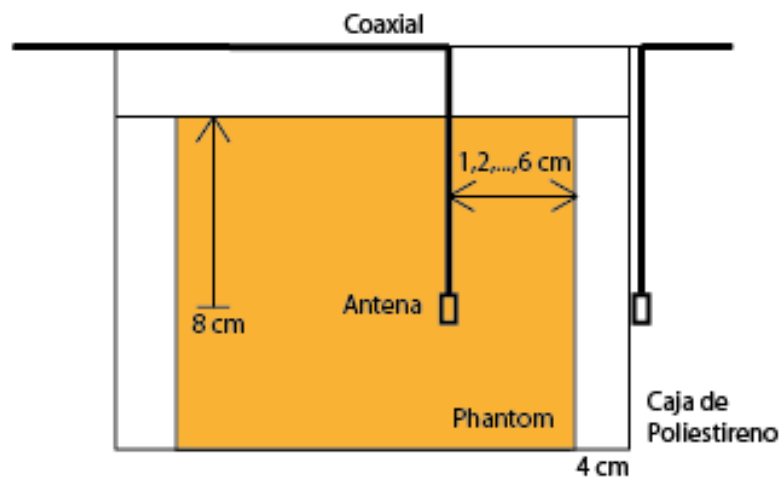


Fig.51 Esquema de mediciones para IB2IB en UWB

Recordamos que seguimos el procedimiento de medida que enunciamos en el apartado 3.3, configurando, calibrando y comprobando el funcionamiento de las antenas como se indica. Para cada una de las distancias obtuvimos nuevamente un total de cinco capturas. Los resultados de cada una de las configuraciones los exponemos a continuación.

5.3.2.1. Resultados

En la figura 52 representamos la respuesta en frecuencia del canal del experimento,  $H(f)$ , con las dos antenas, la interior y la exterior, de tipo parche. Con esta configuración podemos trabajar en toda la banda analizada, de 3.1 GHz a 8.5 GHz.

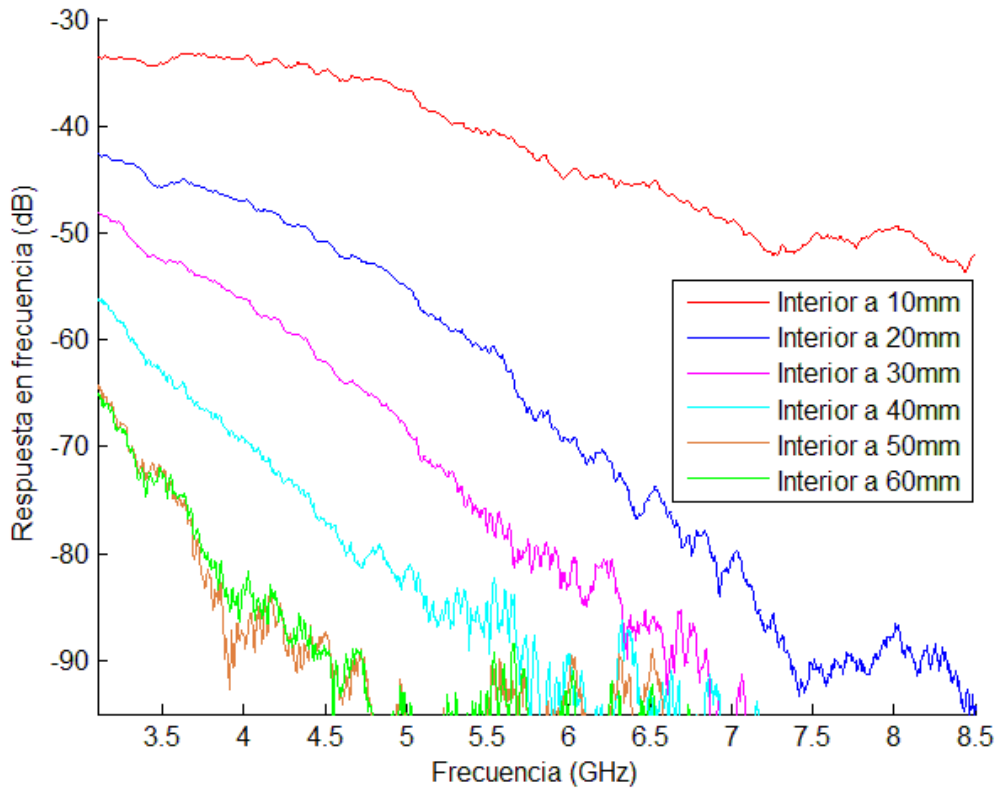


Fig.52 Respuesta en frecuencia de IB2OB con antenas tipo parche en UWB

El factor más evidente que podemos comentar es que aumentar la separación entre antenas provoca una disminución muy acusada del nivel de la señal: en este medio aumentar un centímetro la separación entre antenas provoca una atenuación aproximada de 7 dB.

Podemos observar en la tabla 9 que cuanto mayor es la separación entre las antenas también es más pronunciada la pendiente de decremento de la potencia relativa recibida, al igual que ocurría en el caso de IB2IB.

	Potencia a 3.1 GHz	Potencia a 5.5 GHz	Caída de Potencia
Separación: 20 mm	-42.9 dB	-60.6 dB	17.7 dB
Separación: 40 mm	-56.3 dB	-88.4 dB	32.1 dB

Tabla 9. Aumento de la pendiente de pérdidas al incrementar la separación entre antenas

En la figura 53 representamos las pérdidas para diferentes sub-bandas para la configuración de antenas tipo parche, siendo éste el caso en el que podemos analizar más sub-bandas al poder trabajar hasta 8.5 GHz. En esta gráfica se puede apreciar nuevamente la puntualización de que la pendiente de pérdidas crece a medida que aumentamos la separación entre las antenas. Como es lógico, al aumentar la banda de trabajo aumentan las pérdidas de la señal.

En cualquier caso, las sub-bandas que hemos veremos más adelante en la figura 58 (3.1-3.6 GHz, 3.6-4.1 GHz, 4.1-4.6 GHz, 4.6-4.8 GHz) nos permiten trabajar en aplicaciones de IB2OB para cualquier valor de separación entre las antenas, dejándonos aprovechar todo el ancho de banda de trabajo.

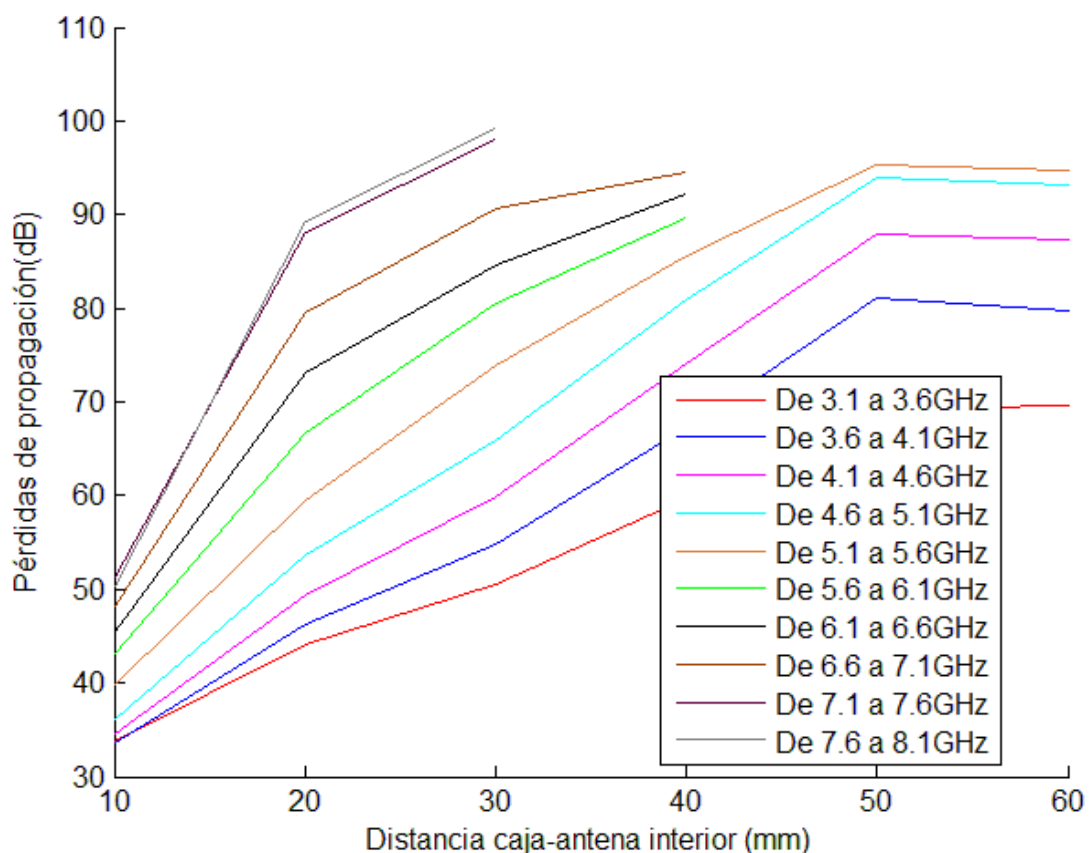


Fig.53 Pérdidas de propagación de IB2OB en bandas de UWB, caso antenas parche

Pasamos ahora a presentar los resultados también para el resto de configuraciones. En las figuras 54, 55 y 56 representamos la respuesta en frecuencia,  $H(f)$ , para cada configuración de antenas indicadas en la tabla 8 en la banda de 3.1 GHz a 4.8 GHz, pues en los casos con antena externa de tipo hélice sólo podemos trabajar hasta 4.8 GHz de frecuencia máxima.

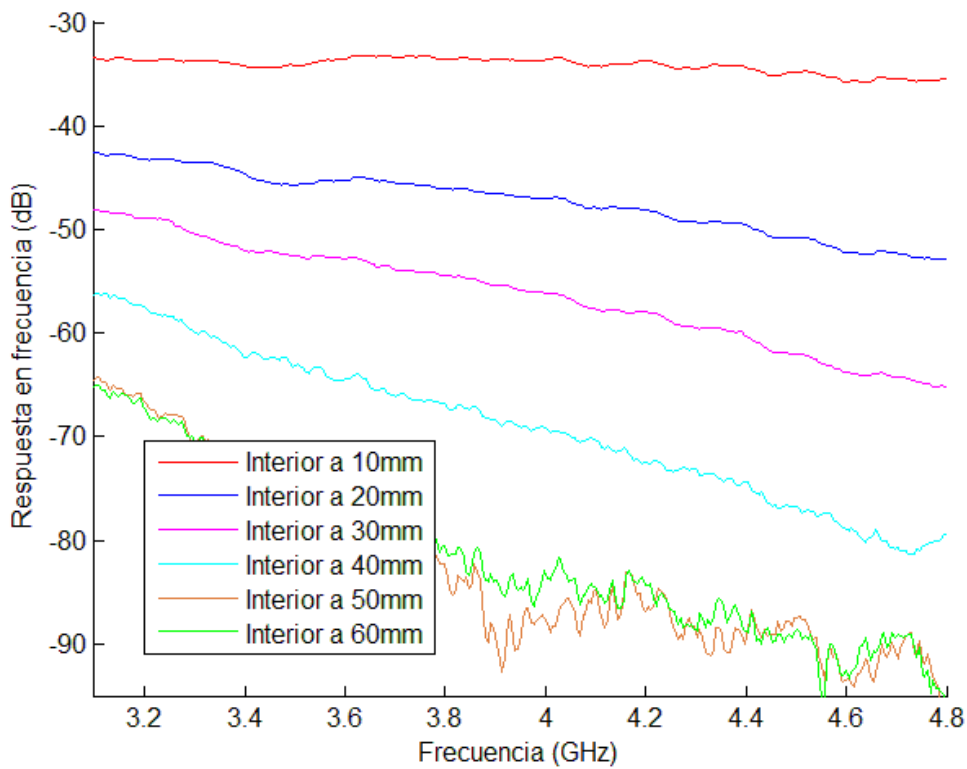


Fig.54 Respuesta en frecuencia de IB2OB con antenas tipo parche de 3.1 a 4.8 GHz

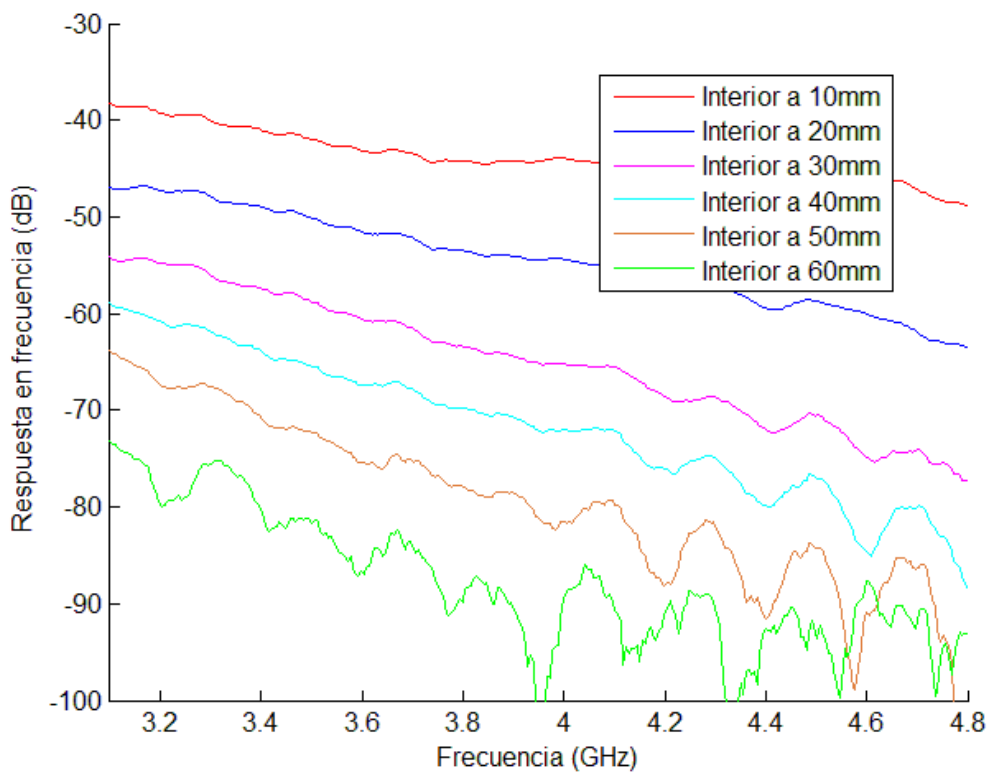
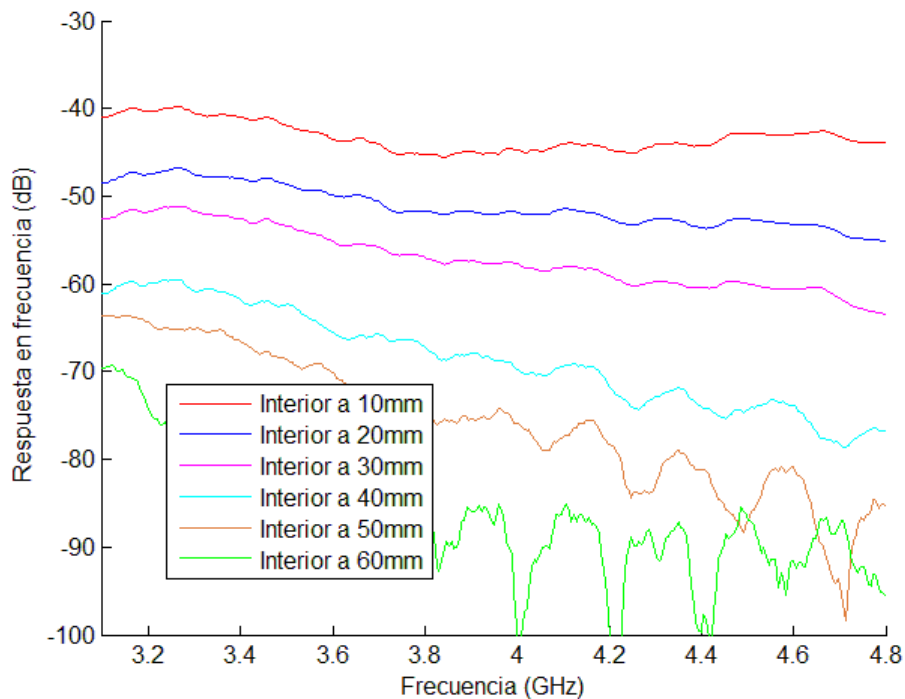


Fig.55 Respuesta en frecuencia de IB2OB con antenas parche y hélice de 3.1 a 4.8 GHz

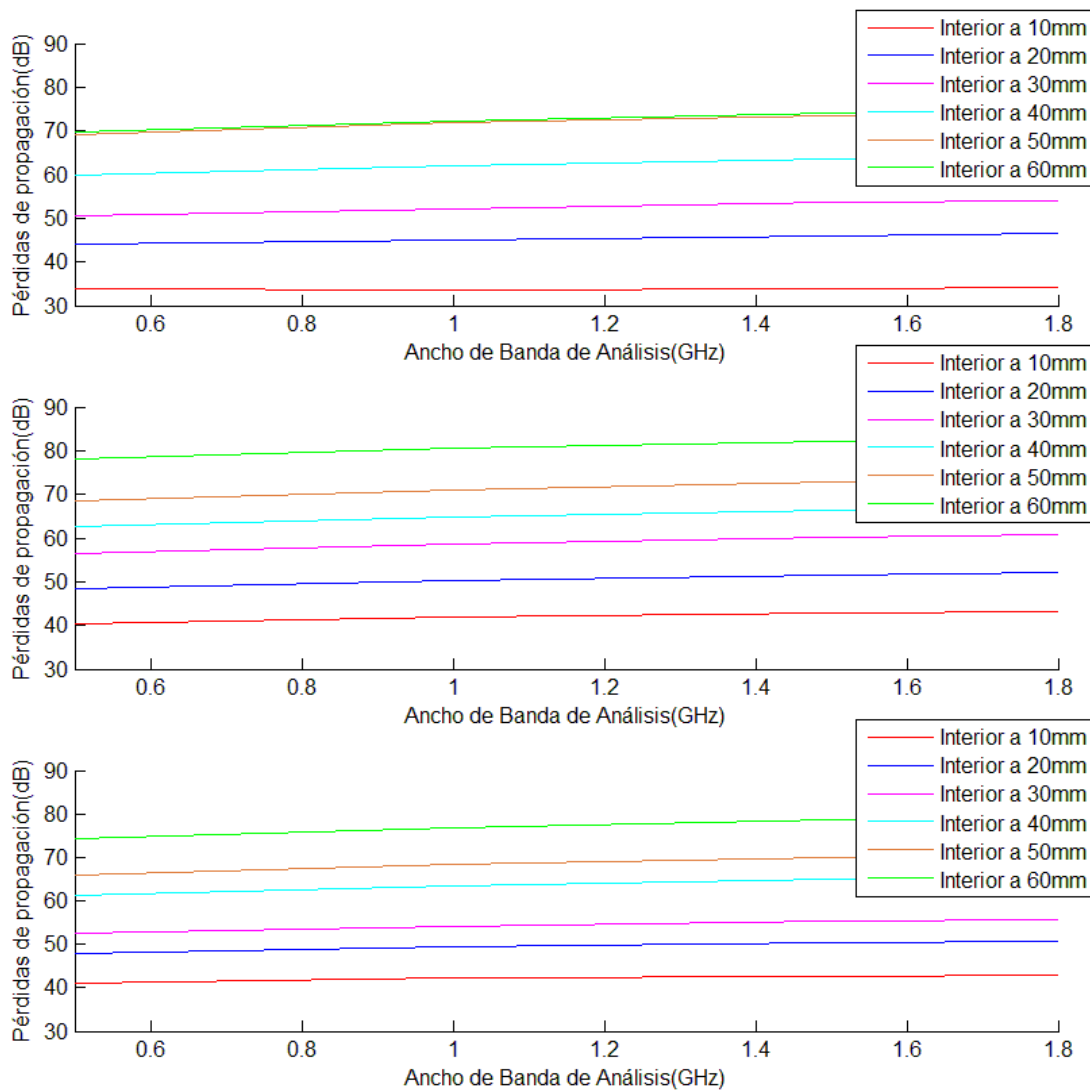


**Fig.56 Respuesta en frecuencia de IB2OB con antenas implantable y hélice de 3.1 a 4.8 GHz**

Podemos observar en las respuestas en frecuencia de los experimentos que los resultados obtenidos son muy similares entre sí, aunque se observan algunas diferencias. Vemos que si empleamos las antenas de tipo parche tanto en el exterior como en el interior del phantom la potencia recibida es mayor que empleando combinaciones híbridas de parche con hélice o de implantable con hélice, probablemente por las características propias de las antenas (ya que si bien las antenas tipo parche son omnidireccionales, las hélice es directiva y pueden producirse algunas pérdidas por desalineamiento).

Pero aparte de la influencia que hayan podido tener las antenas, se sigue comprobando una caída aproximada de 6-7 dB al aumentar un centímetro la separación entre las antenas. También se sigue apreciando un incremento de la pendiente de pérdidas al aumentar la separación de las antenas.

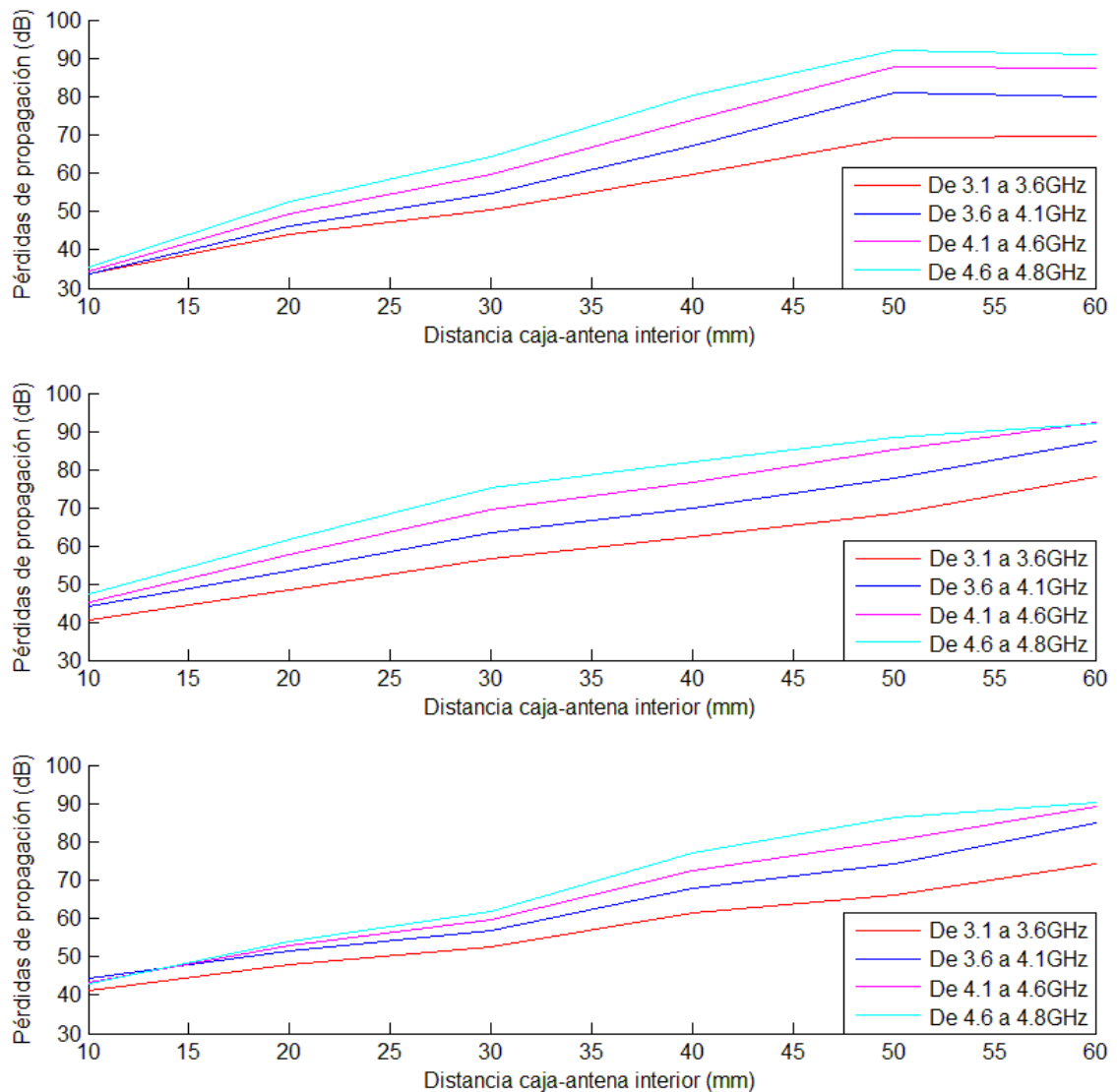
En la figura 57 están representadas las pérdidas de propagación conforme aumentamos el ancho de banda de trabajo. No se acaba de apreciar un incremento muy pronunciado de las pérdidas de la señal ya que después de realizar la media de las pérdidas de la banda en lineal se pasa a unidades logarítmicas. Debido a la naturaleza de estas unidades, los valores más altos tienen mucha mayor ponderación que los bajos, por lo que las pérdidas de las frecuencias más bajas de la banda son más influyentes.



**Fig.57 Pérdidas de propagación de IB2OB al aumentar el ancho de banda de trabajo en UWB Antenas Parche-Parche (arriba), Parche-Hélice (centro), Implantable-Hélice (abajo)**

En la figura 58 podemos observar las pérdidas de propagación en función de la separación entre antenas para diferentes sub-bandas de 500 MHz del espectro de UWB (excepto la última sub-banda, ya que no debemos exceder los 4.8 GHz) y para cada una de las configuraciones.

Obviamente se observa para todas las configuraciones que al subir de banda de frecuencias la señal tiene más pérdidas (como vimos en la figura 53 al analizar el caso de antenas parche hasta 8.5 GHz), pérdidas que son menores cuando las antenas están más cercanas entre sí (distancias de antena interior hasta la caja menores de 30 mm). Esto es así ya que a menor separación entre antenas menos decae la potencia con el aumento de la frecuencia, como podemos observar en las gráficas de respuesta en frecuencia y comprobamos en la tabla 9 para el caso de las antenas tipo parche.



**Fig.58 Pérdidas de propagación de IB2OB en bandas de UWB Antenas Parche-Parche (arriba), Parche-Hélice (centro), Implantable-Hélice (abajo)**

La gráfica 59 se obtiene tomando la banda de UWB de 3.1 GHz a 4.8 GHz. En ella podemos observar las pérdidas de propagación para cada una de las distancias entre antenas y para cada una de las configuraciones.

A partir de estos valores tratamos de obtener un modelo que refleje el comportamiento del canal. En este caso la solución no es tan evidente como en el caso de IB2IB, a pesar de que a primera vista podríamos emplear un modelo lineal. Se han analizado tres posibles modelos para ver cuál es más adecuado: el modelo lineal de una pendiente, el modelo lineal de doble pendiente y un modelo con el logaritmo de la distancia.



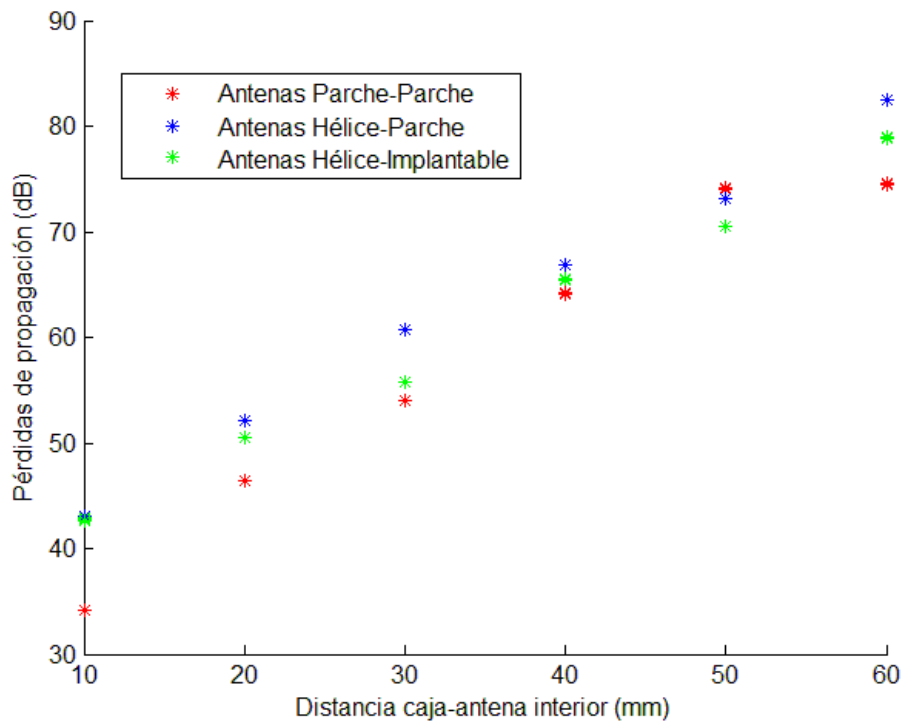


Fig.59 Pérdidas de propagación de IB2OB de 3.1 a 4.8 GHz

La ecuación del modelo lineal (20) de pendiente única podemos observarla en capítulos anteriores. El modelo lineal de doble pendiente podemos definirlo conforme a la ecuación (21).

$$L_{prop}(d)|_{dB} = \begin{cases} L0 + \alpha_0 d, & d < d_{break} \\ L1 + \alpha_1 d, & d \geq d_{break} \end{cases} \quad (21)$$

La distancia  $d_{break}$  se corresponde con la distancia en la que cambia la tendencia lineal inicial.

Y por último el modelo con el logaritmo de la distancia, que podemos definir según:

$$L_{prop}(d)|_{dB} = L0 + 10a \log(d) \quad (22)$$

Para obtener el modelado adecuado para cada una de las configuraciones, obtendremos el error cuadrático empleando cada uno de ellos. Este estimador de error mide el promedio de los errores al cuadrado, es decir, la diferencia entre el modelo y aquello que está modelando (en este caso, las medidas de pérdidas de propagación). Para el cálculo del error emplearemos la ecuación:

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \sum (PL_{modelo} - PL_{medido})^2 \quad (23)$$

Donde n es el número de medidas realizadas.

En la tabla 10 podemos observar el error obtenido considerando los tres tipos de modelos de pérdidas de propagación. De esta forma, comprobamos que el modelo logarítmico no se ajusta bien a los datos, su error es muy grande: este hecho se esperaba una vez vistos los valores puntuales de pérdidas de propagación, cuya tendencia es más bien lineal. No obstante lo tenemos en cuenta puesto que es un modelo bastante empleado en medios con presencia de aire, y la caja que separa el phantom de la antena On-Body se puede modelar como aire en la transmisión. No es un modelo válido al ser el phantom más predominante en la transmisión que el aire.

	Antenas Parche-Parche	Antenas Parche-Hélice	Antenas Implantable-Hélice
Modelo lineal una pendiente	<b>7,6471</b>	<b>0,9065</b>	<b>0,7233</b>
Modelo lineal doble pendiente	<b>2,7085</b>	<b>0,4306</b>	<b>0,8245</b>
Modelo logarítmico	<b>6,6491</b>	<b>8,3832</b>	<b>11,0609</b>

Tabla 10. Error obtenido para cada modelo con cada configuración de antenas

Viendo los resultados obtenidos, el modelo que menor error presenta teniendo en cuenta los tres tipos de antenas es el de doble pendiente. Este modelo refleja bastante bien el hecho de que la pendiente de pérdidas cambia de tendencia a partir de cierto valor de separación entre las antenas, como se puede apreciar a simple vista, motivo por el que no nos hemos decantado por el método lineal de pendiente única. Un posible motivo de este hecho es el cambio de medio, ya que es entre los 30 y los 40 mm cuando el espacio recorrido por la señal en el phantom se equipara al espacio recorrido en el aire (por la caja).

Los parámetros del modelo obtenidos para cada configuración al aplicar el modelo de doble pendiente los podemos observar en la tabla 11.

	Antenas Parche - Parche	Antenas Parche - Hélice	Antenas Implantable - Hélice
<b><math>L_0</math> (dB)</b>	<b>25,2320</b>	<b>34,2743</b>	<b>35,2802</b>
<b><math>\alpha_0</math> (dB/mm)</b>	<b>0,9792</b>	<b>0,8848</b>	<b>0,7342</b>
<b><math>d_{break}</math> (mm)</b>	<b>400</b>	<b>300</b>	<b>400</b>
<b><math>L_1</math> (dB)</b>	<b>45,2170</b>	<b>38,6275</b>	<b>38,0268</b>
<b><math>\alpha_1</math> (dB/mm)</b>	<b>0,5146</b>	<b>0,7155</b>	<b>0,6726</b>

Tabla 11. Coeficientes del modelo de doble pendiente para IB2OB en UWB

En la gráfica 60 podemos observar que el comportamiento del canal es bastante similar entre las tres configuraciones: las pérdidas que se producen entre la primera y la última medida son prácticamente idénticas.

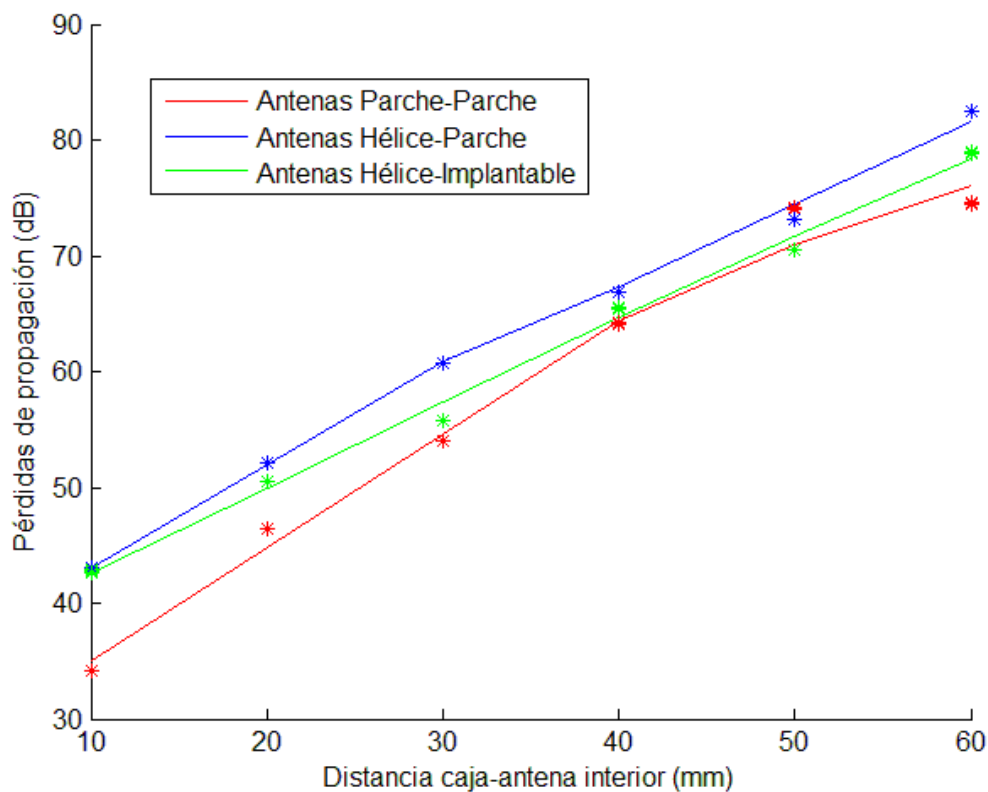


Fig.60 Pérdidas de propagación de IB2OB de 3.1 a 4.8 GHz con modelo de doble pendiente

### 5.3.3. Banda ISM

De forma análoga al caso UWB, vamos a analizar el canal IB2OB para la banda ISM. En la tabla 12 podemos observar los parámetros de configuración (idénticos al caso análogo de IB2IB), así como el tipo de antena utilizado y el nivel de ruido con el que trabajamos.

Número de Puntos del VNA	20001
Banda de Frecuencias	2.36 GHz a 2.5 GHz
Ancho de banda de resolución	3 kHz
Potencia de transmisión	5 dBm
Tipo de Antenas	Dipolo (fig. 11) – Hélice ISM (fig. 12)
Nivel de ruido	-90 dBm

Tabla 12. Configuración del equipo, antena empleada y nivel de ruido para IB2OB en ISM

Tomamos medidas partiendo de 10 mm de la antena interior hasta la caja y aumentando dicha separación en pasos de 10 mm hasta llegar en este caso hasta los 80 mm. Recordar que, al igual que en UWB, el grosor de la caja de poliestireno es de 40 mm, por lo que las antenas estarán separadas inicialmente 50 mm, siendo 10 mm de phantom (líquido). Podemos observar la disposición en la figura 50, del apartado de UWB. Para cada una de las distancias obtuvimos de nuevo un total de cinco capturas.

### 5.3.3.1. Resultados

En la gráfica 61 observamos la respuesta en frecuencia del canal,  $H(f)$ . A diferencia del caso de UWB, no se aprecia una caída conforme aumentamos en frecuencia puesto que la banda de análisis es mucho menor. Sí que podemos observar una disminución muy acusada de la señal cuando aumentamos la separación entre las antenas: aumentarla un centímetro provoca una atenuación de unos 6 dB.

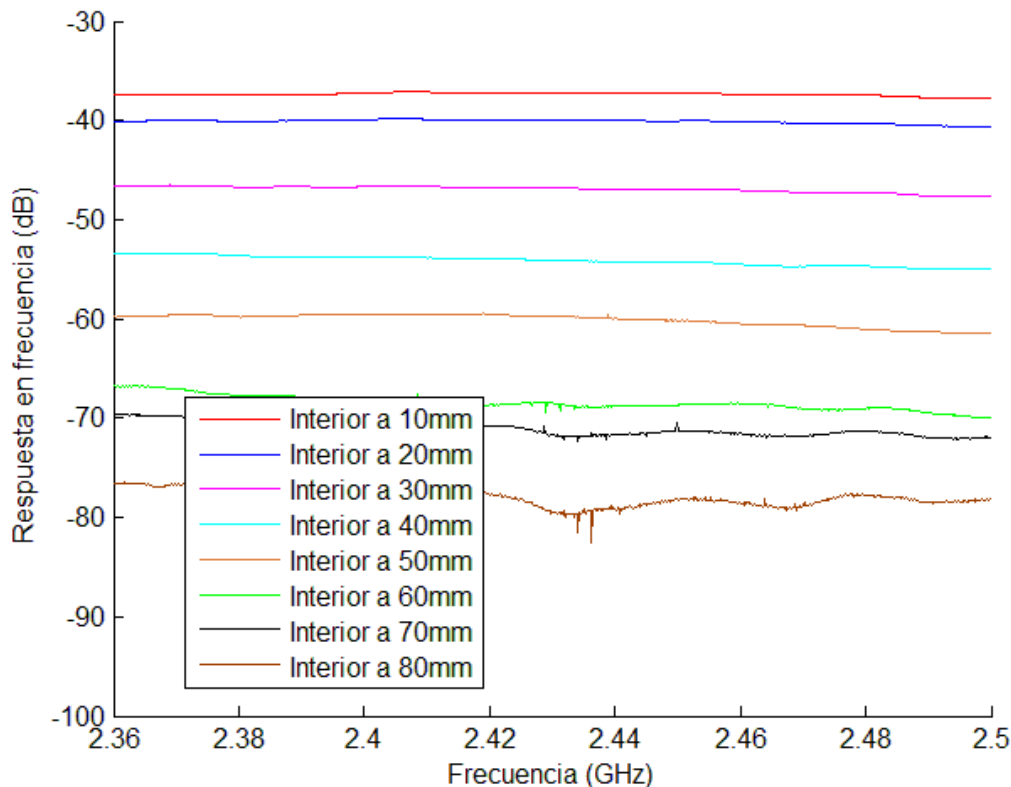


Fig.61 Respuesta en frecuencia de IB2OB en ISM

El factor negativo de emplear la banda de ISM frente a UWB es el ancho de banda, que es mucho menor, como ya comentamos en el caso análogo de IB2IB. No obstante, supone una mejora con respecto a las frecuencias que se emplean ahora (MICS), tanto en cuanto a ancho de banda como en el tamaño de las antenas.

En la figura 62 mostramos las pérdidas de propagación en función de la separación entre antenas de las dos sub-bandas del espectro de ISM: la sub-banda de 2.36-2.4 GHz y la de 2.4-2.5 GHz. Las pérdidas son prácticamente idénticas, al estar en bandas contiguas y no tener un ancho muy elevado. Ambas sub-bandas nos permiten trabajar con un margen adecuado de distancias entre antenas.

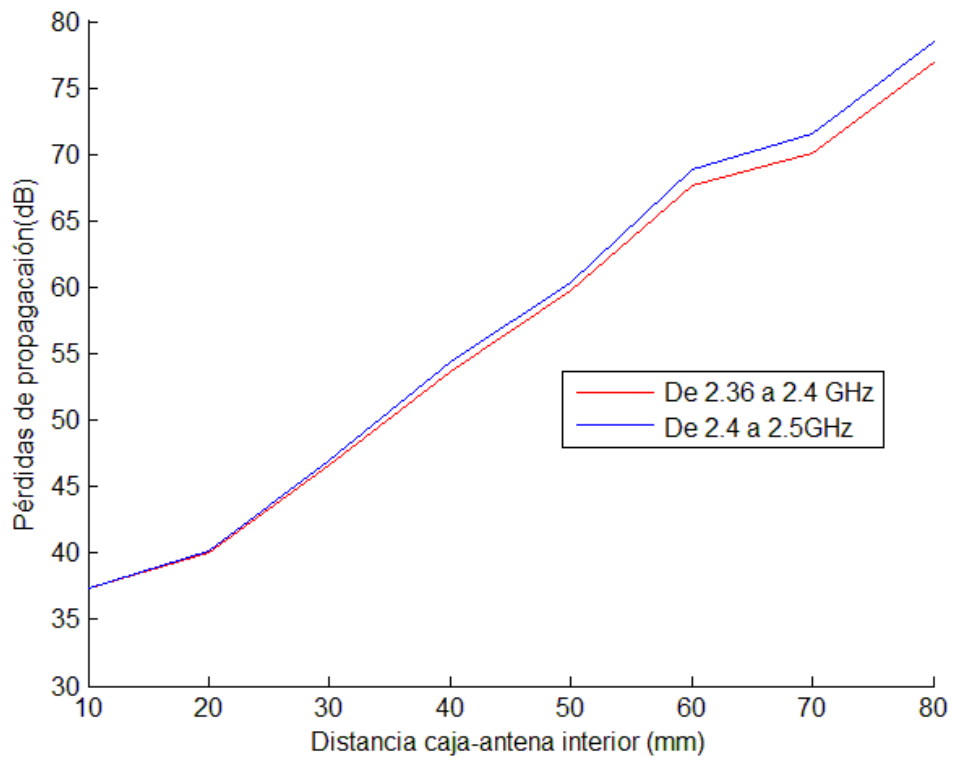


Fig.62 Pérdidas de propagación de IB2OB en sub-bandas de ISM

La gráfica 63 es la resultante de tomar toda la banda ISM medida. En ella podemos observar las pérdidas de propagación para cada una de las distancias entre antenas.

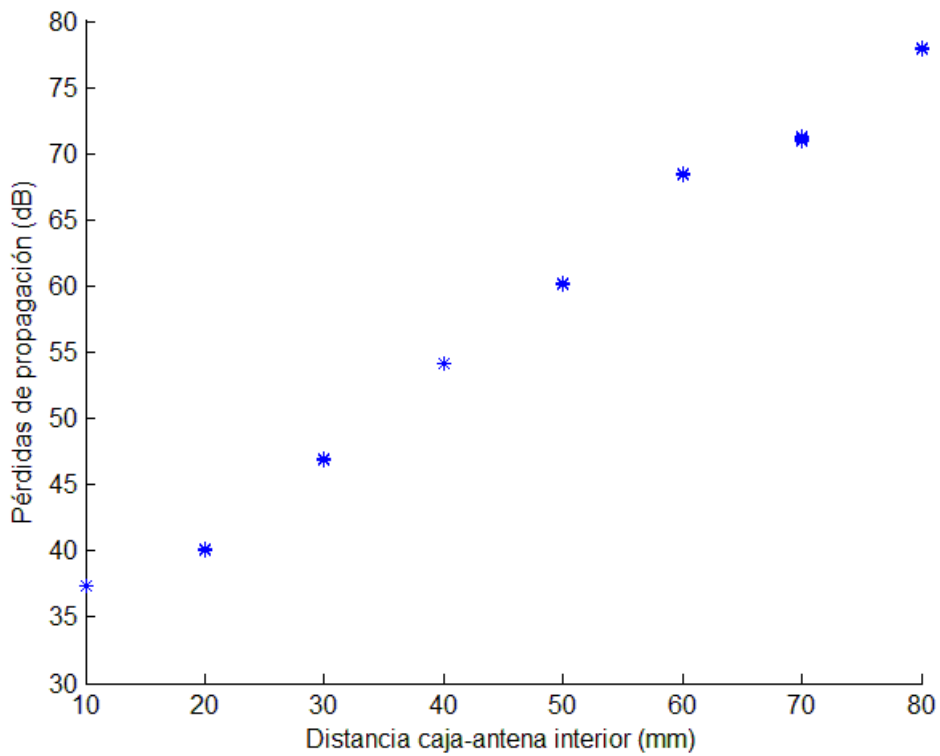


Fig.63 Pérdidas de propagación de IB2OB en ISM

A partir de estos valores tratamos de obtener un modelo que refleje el comportamiento del canal. Emplearemos nuevamente el modelo de doble pendiente que vimos en el apartado de UWB en la ecuación (21), ya que su error es un poco menor al del modelo lineal.

Los coeficientes obtenidos para modelar el comportamiento del canal se muestran en la tabla 13, y en la gráfica 64 representamos los valores medidos de pérdidas de propagación conjuntamente con el modelo a doble pendiente.

<b><math>L_0</math> (dB)</b>	<b>29,8726</b>
<b><math>\alpha_0</math> (dB/mm)</b>	<b>0,5953</b>
<b><math>d_{break}</math> (mm)</b>	<b>600</b>
<b><math>L_1</math> (dB)</b>	<b>32,9229</b>
<b><math>\alpha_1</math> (dB/mm)</b>	<b>0,5613</b>

Tabla 13. Coeficientes del modelo de doble pendiente para IB2OB en ISM

Podemos apreciar unos niveles de pérdidas en el canal tanto muy similares al caso de IB2IB, cayendo en este caso casi 6 dB de potencia con cada centímetro que separamos las antenas.

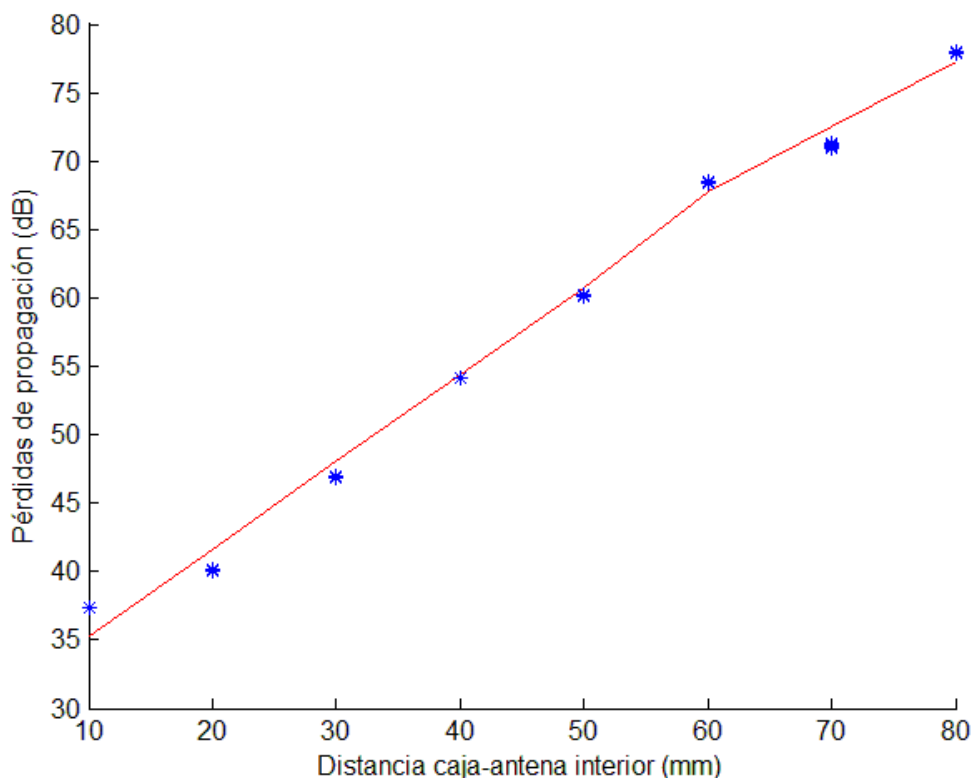


Fig.64 Pérdidas de propagación de IB2OB en ISM con modelo de doble pendiente

## 5.4. Caso In-Body to Off-Body

### 5.4.1. Disposición del experimento

La disposición del caso de In-Body to Off-Body (IB2OFF) es idéntica a la del caso anterior. Como explicamos al introducir los casos, la diferencia es que la antena exterior hay que ir alejándola progresivamente para realizar las medidas, también es una separación variable. Para el estudio del canal se realizaron tandas con diferentes distancias de antena implantada, por lo que a diferencia del resto de casos podemos considerar que ambas antenas son variables y no sólo una de ellas.

### 5.4.2. UWB

En la tabla 14 podemos observar los parámetros de configuración empleados, así como el tipo de antena utilizado y el nivel de ruido con el que trabajamos.

Número de Puntos del VNA	20001
Banda de Frecuencias	3.1 GHz a 8.5 GHz
Ancho de banda de resolución	3 kHz
Potencia de transmisión	10 dBm
Tipo de Antenas	Parche - Parche (fig. 8, protegidas)
Nivel de ruido	-105 dBm

Tabla 14. Configuración del equipo, antena empleada y nivel de ruido para IB2OFF en UWB

Se realizaron cuatro tandas de experimentos, cada una de ellas con una distancia de antena implantada a la caja diferente: comenzamos desde 10 mm, seguimos con 20 mm, otra de 30 mm y finalizamos con una tanda a 50 mm. En cada una de ellas, medimos el parámetro S21 para varias distancias entre la caja y la antena exterior, tal y como muestra la figura 65. Como en el caso de IB2OB, hay que tener en cuenta el grosor de la caja.

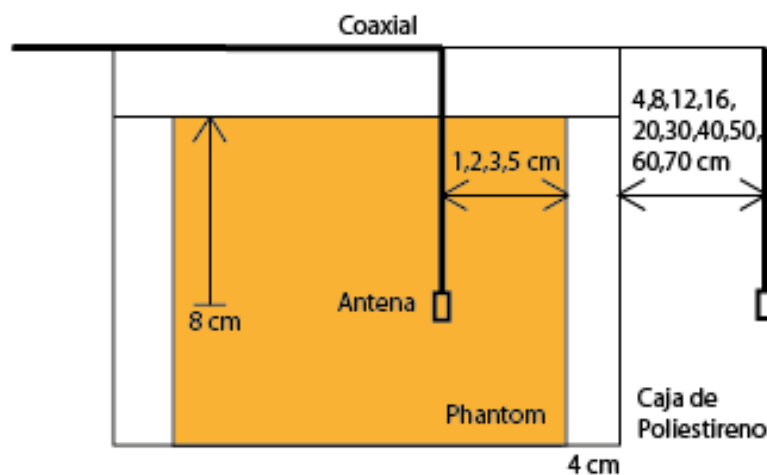
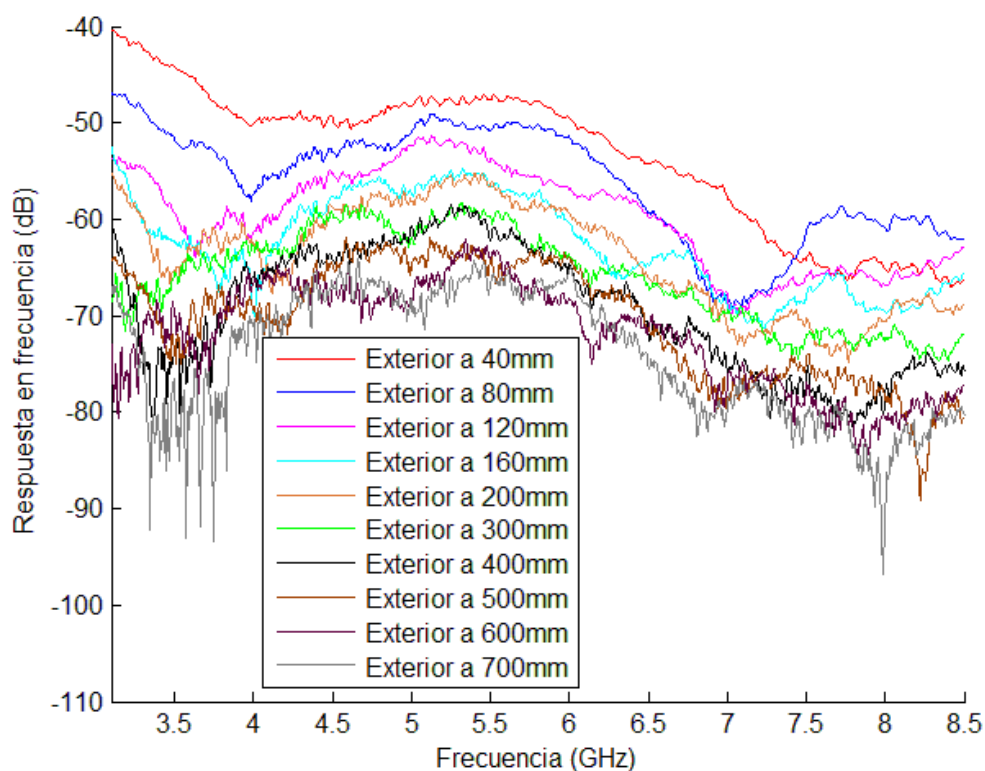


Fig.65 Esquema de mediciones para IB2OFF en UWB

### 5.4.2.1. Resultados

En la figura 66 representamos la respuesta en frecuencia del canal,  $H(f)$ , fijando la antena interior hasta la caja en 10 mm, y variando la distancia de la antena exterior conforme vemos en la figura 65.

Podemos comentar que si la antena implantada en el phantom está cerca de la superficie (en este caso la caja que contiene el phantom) podemos alejar la externa una distancia considerable y seguiríamos obteniendo valores de pérdidas razonables. Además podemos observar que a medida de separamos las antenas las pérdidas dejan de aumentar de forma lineal. Analizaremos este efecto más adelante.

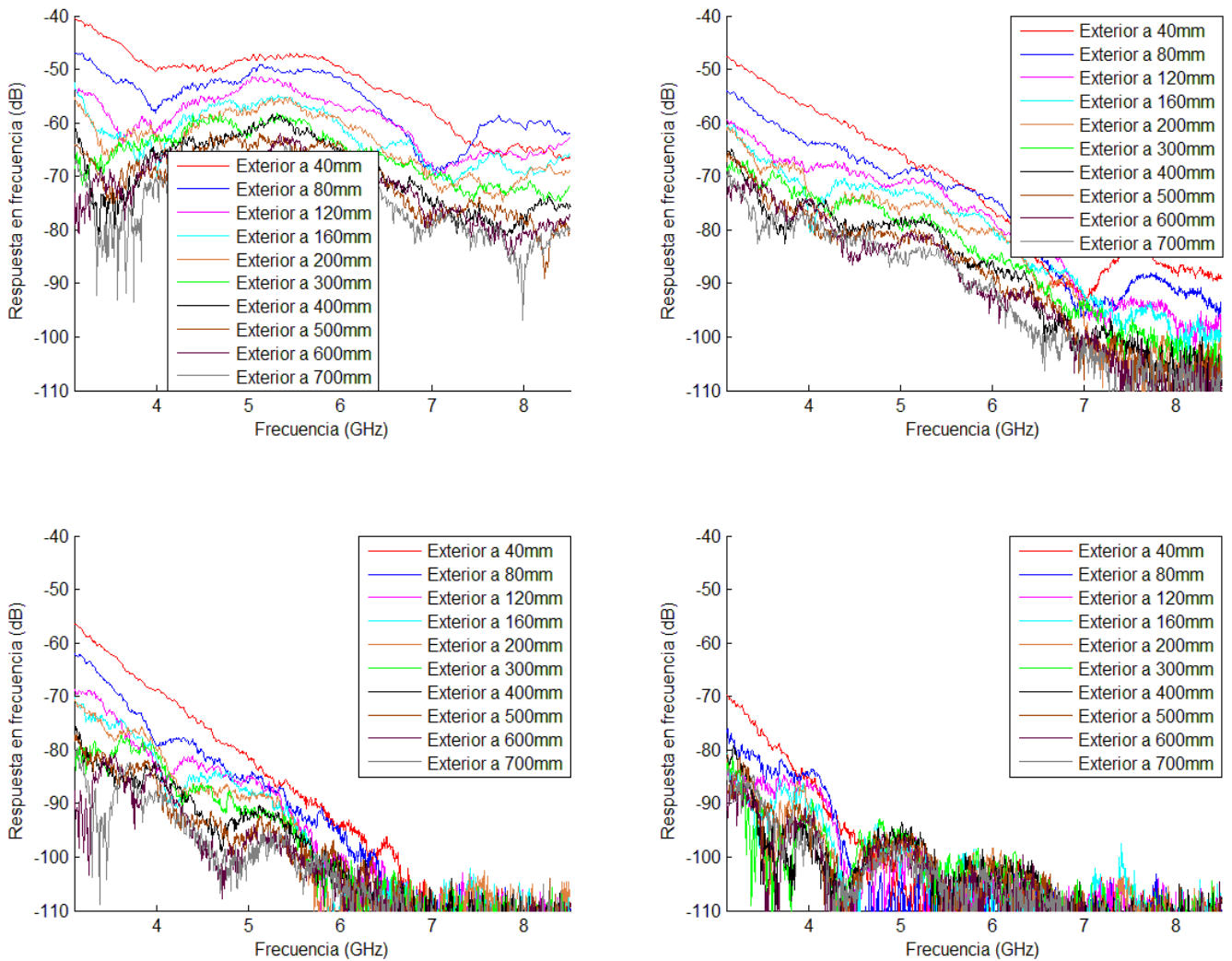


**Fig.66 Respuesta en frecuencia de IB2OFF en UWB, antena interior a 10 mm**

En la figura 67 representamos la respuesta del canal para distancias de antena interior hasta la caja de 20, 30 y 50 mm. Podemos comprobar que, como hemos visto a lo largo de los casos anteriores, al aumentar la distancia de la antena situada en el interior del phantom hasta la caja las pérdidas aumentan de forma considerable, unos 6 dB por centímetro.

El principal inconveniente que provoca no es tanto que no podamos introducir más la antena ubicada en el interior del phantom, si no que la frecuencia máxima de trabajo disminuye. Además, llegará un punto en el que cuanto más alejemos la antena interior menos podremos aumentar la separación de la exterior y seguir recibiendo un nivel aceptable de señal.

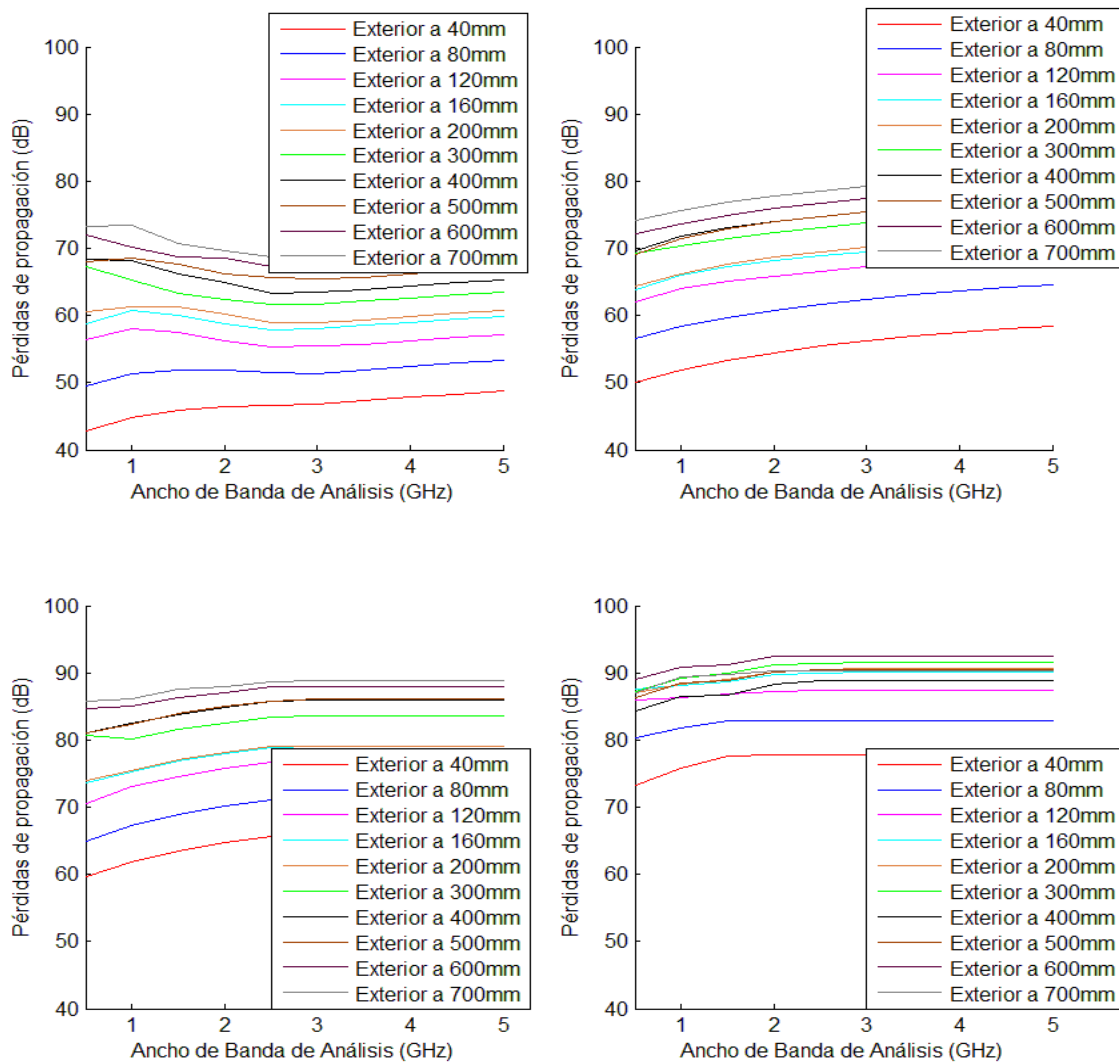




**Fig.67 Respuesta en frecuencia de IB2OFF en UWB, diferentes distancias de antena interior a caja 10 mm (arriba izquierda), 20 mm (arriba derecha), 30 mm (abajo izquierda), 50 mm (abajo derecha)**

En la figura 68 están representadas las pérdidas de propagación en función del ancho de banda, para cada una de las tandas de diferentes separaciones de la antena interior hasta la caja. Aquí podemos observar un detalle interesante: las pérdidas no aumentan de forma lineal con la separación entre las antenas, si no de forma logarítmica.

Este fenómeno se produce puesto que tenemos dos zonas de influencia: la zona en la que predomina el efecto de las pérdidas del interior del phantom, en el cual podríamos catalogar la tendencia del aumento de las pérdidas con la distancia como lineal, y otra segunda zona en la que predomina el efecto del aire.



**Fig.68 Pérdidas de propagación de IB2OFF al aumentar el ancho de banda en UWB, 10 mm (arriba izquierda), 20 mm (arriba derecha), 30 mm (abajo izquierda), 50 mm (abajo derecha)**

En la figura 69 mostramos las pérdidas de propagación en función de la separación entre antenas para diferentes sub-bandas de 500 MHz del espectro de UWB. Hemos optado por mostrar sólo la tanda de medidas en la que la antena interior está a 20 mm de la caja, pues para el resto de tandas los resultados siguen una tendencia similar.

Podemos observar que las pérdidas aumentan unos 3-4 dB de media entre cada sub-banda debido al aumento de la frecuencia. También podemos apreciar las dos zonas de influencia que comentamos anteriormente en las sub-bandas. Al igual que ocurría en los otros casos de UWB, la parte baja del espectro de UWB es más adecuada para transmisiones en distancias largas, debido a sus menores pérdidas. Si no hay una separación excesiva entre la antena implantada y la caja, podemos transmitir a distancias exteriores superiores a 1 metro en las sub-bandas más bajas.

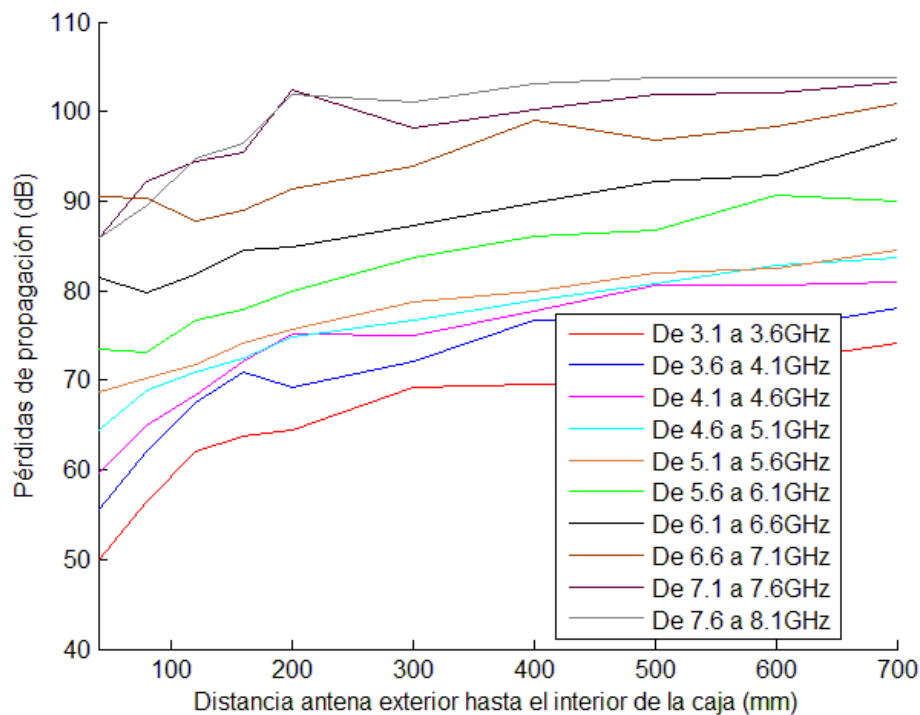


Fig.69 Pérdidas de propagación de IB2OFF en bandas de UWB, antena interior a 20 mm

Observando las pérdidas de propagación para cada configuración en la banda de 3.1 a 4.8 GHz, tratamos de obtener un modelo que refleje el comportamiento del canal. Emplearemos un modelo con el logaritmo de la distancia (introducida en milímetros), cuya fórmula volvemos a representar en la ecuación (24).

$$L_{prop}(d)|_{dB} = L0 + 10\alpha \log(d) \quad (24)$$

Los coeficientes obtenidos para modelar el comportamiento del canal para cada banda se muestran en la tabla 15, y en la gráfica 70 representamos los valores obtenidos de pérdidas de propagación conjuntamente con el modelo, también para todas las bandas. En la figura 71 representamos los mismos datos pero en esta ocasión con el eje de abscisas en unidades logarítmicas.

	10 mm	20 mm	30 mm	50 mm
<b>L0 (dB)</b>	<b>17,2446</b>	<b>27,1082</b>	<b>33,9413</b>	<b>65,3244</b>
<b><math>\alpha</math></b>	<b>1,8590</b>	<b>1,7678</b>	<b>1,9153</b>	<b>1,0029</b>

Tabla 15. Coeficientes del modelo logarítmico para IB2OFF en UWB

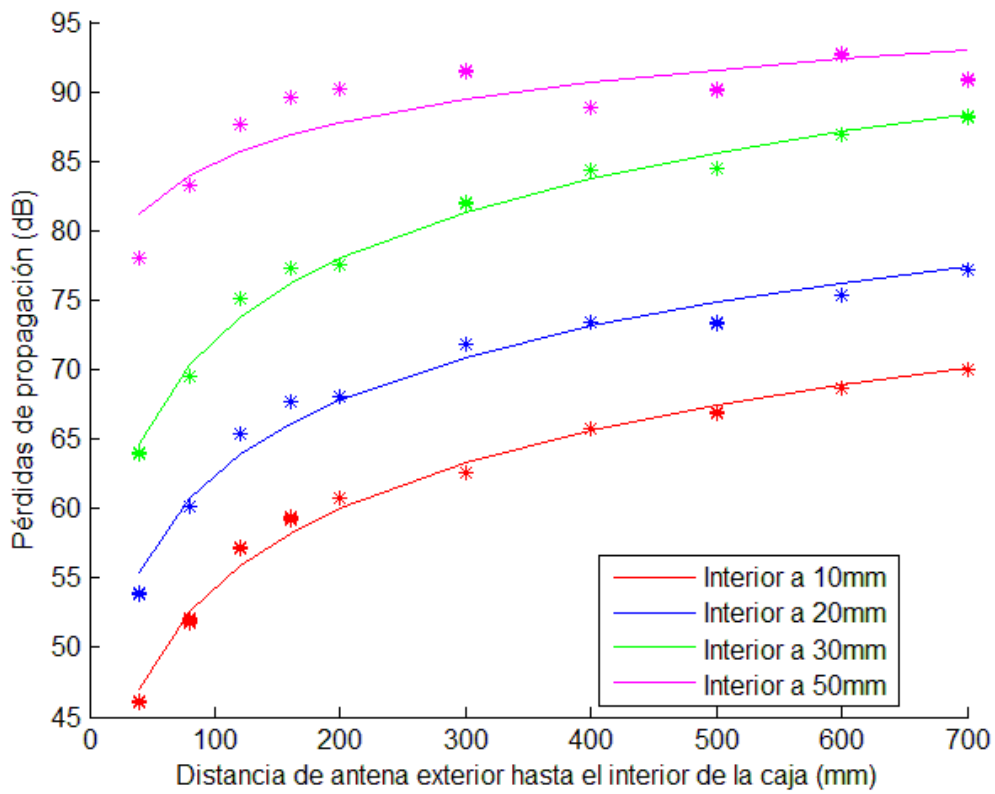


Fig.70 Pérdidas de propagación de IB2OFF de 3.1 a 4.8 GHz con modelo logarítmico (eje de abscisas en lineal)

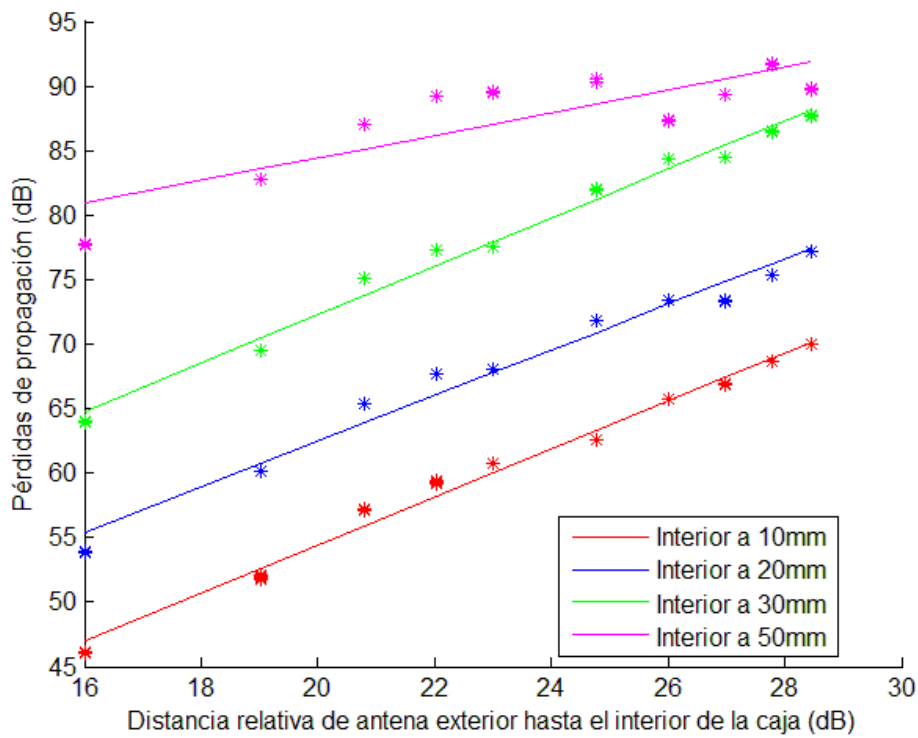


Fig.71 Pérdidas de propagación de IB2OFF de 3.1 a 4.8 GHz con modelo logarítmico (eje de abscisas en unidades logarítmicas)

5.4.3. Banda ISM

De forma análoga al caso UWB, vamos a analizar el canal IB2OFF para la banda ISM. En la tabla 16 podemos observar los parámetros de configuración, que serán idénticos al caso IB2OB, así como el tipo de antena utilizado y el nivel de ruido con el que trabajamos.

Número de Puntos del VNA	20001
Banda de Frecuencias	2.36 GHz a 2.5 GHz
Ancho de banda de resolución	3 kHz
Potencia de transmisión	5 dBm
Tipo de Antenas	Dipolo (fig. 11) – Hélice ISM (fig. 12)
Nivel de ruido	-105 dBm

Tabla 16. Configuración del equipo, antena empleada y nivel de ruido para IB2OFF en ISM

Se realizaron tres tandas, con separaciones de 10, 20 y 30 mm de antena interior hasta la caja. En cada tanda se partió de una separación de antena exterior hasta la caja de 40 mm, aumentando dicha separación en pasos de 40 mm hasta 300 mm, para después aumentarla en pasos de 100 mm hasta los 500 mm, como podemos observar en la figura 72.

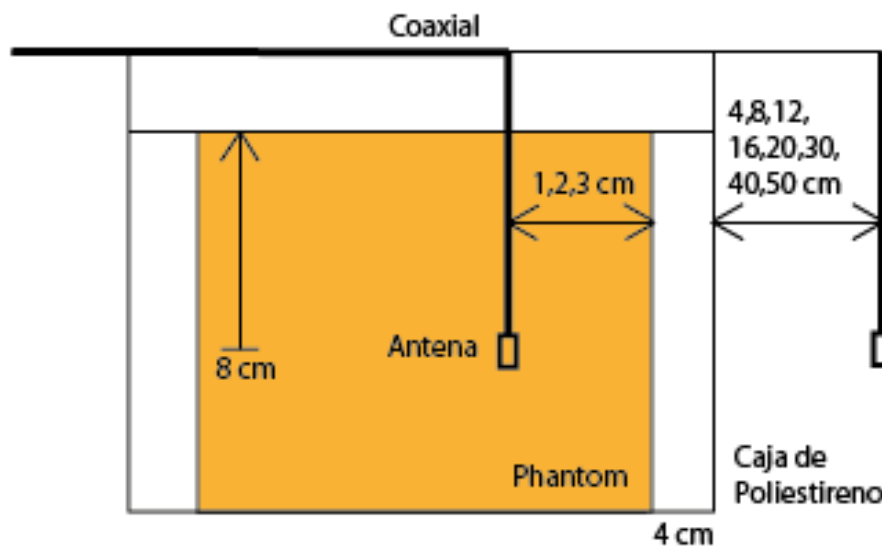
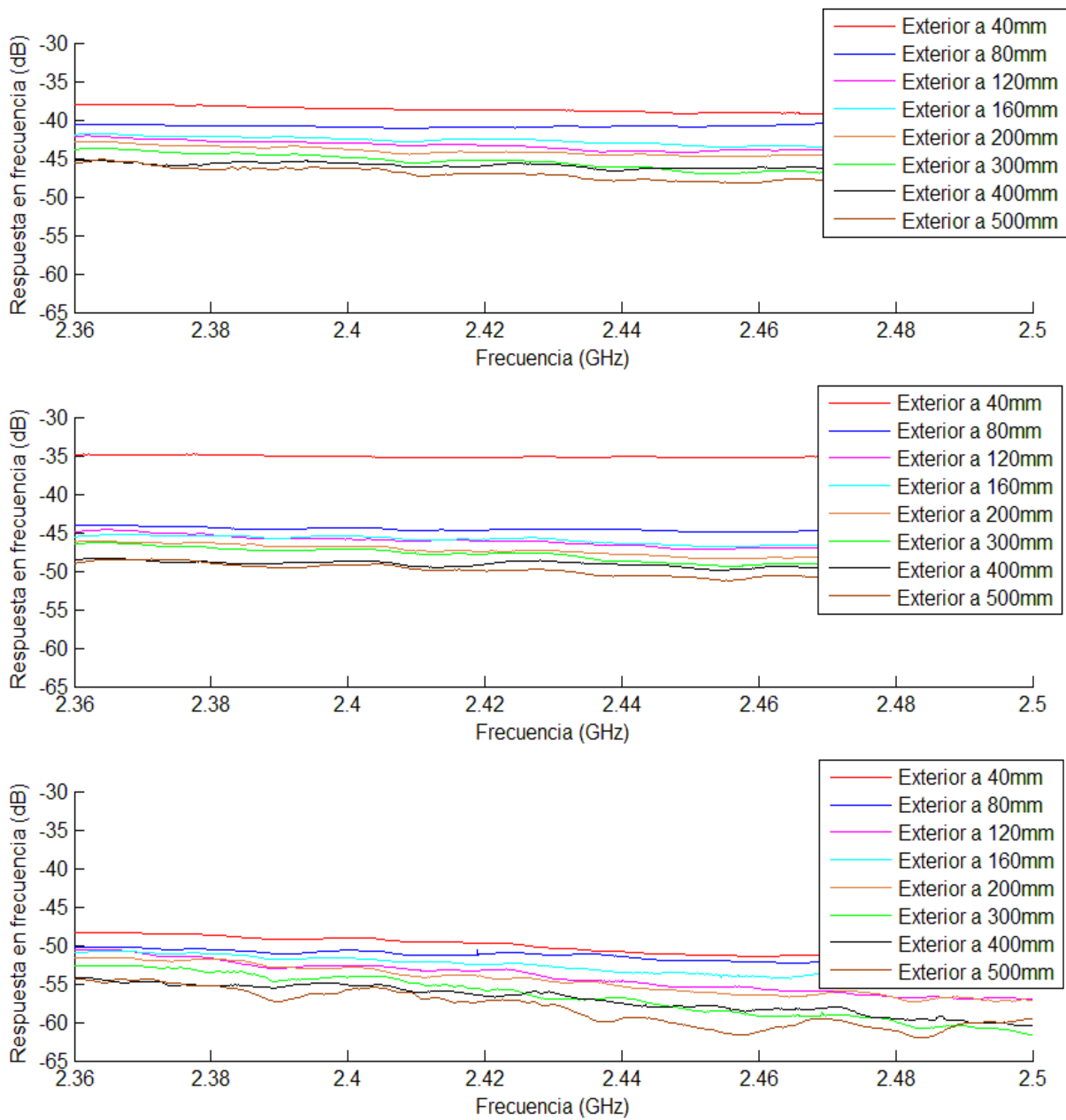


Fig.72 Esquema de mediciones para IB2OFF en ISM

5.4.3.1. Resultados

En la figura 73 representamos la respuesta del canal, H(f), para distancias de antena interior hasta la caja de 10, 20 y 30 mm. La hostilidad del canal se sigue observando, al aumentar la distancia de la antena situada en el interior del phantom hasta la caja las pérdidas aumentan bastante, aquí vemos que del orden de 5 dB.



**Fig.73 Pérdidas de propagación de IB2OFF al aumentar el ancho de banda trabajo en ISM, diferentes distancias de antena interior a caja. 10 mm (arriba), 20 mm (centro), 30 mm (abajo)**

Comentar que, como en el resto de casos que se han realizado para la banda ISM, la respuesta en frecuencia es prácticamente plana al analizar un ancho de banda relativamente pequeño, y también vemos que aumentar la distancia de la antena externa a la superficie de la caja no provoca un aumento de pérdidas muy alto, pues en el aire la señal pierde mucha menos potencia que en el phantom.

En la segunda tanda de medidas podemos observar que hay un posible error de medida, ya que la primera de sus medidas, en la que la hélice exterior estaba situada a 40 mm de la caja tiene una respuesta en frecuencia significativamente alta con respecto al resto.

En esta ocasión no vamos a diferenciar en esta ocasión entre las sub-bandas de 2.36-2.4 GHz y 2.4-2.5 GHz puesto que las diferencias entre ambas son muy pequeñas, como vimos en los casos anteriores para la banda ISM.

Vamos a emplear un modelo de pérdidas lineal con el logaritmo de la distancia, cuya fórmula vimos en la ecuación (24), del mismo modo que hicimos en el caso de UWB. Podemos observar los coeficientes de modelado en la tabla 17. En las figuras 74 y 75 observaremos los valores de pérdidas medidos con el modelo escogido, una de ellas con el eje de abscisas en escala logarítmica. Podemos confirmar que el modelo se ajusta bastante bien a los datos.

	10 mm	20 mm	30 mm
<b><math>L_0</math> (dB)</b>	<b>27,0115</b>	<b>32,2740</b>	<b>38,8621</b>
<b><math>\alpha</math></b>	<b>0,7415</b>	<b>0,6496</b>	<b>0,6782</b>

Tabla 17. Coeficientes del modelo logarítmico para IB2OFF en ISM

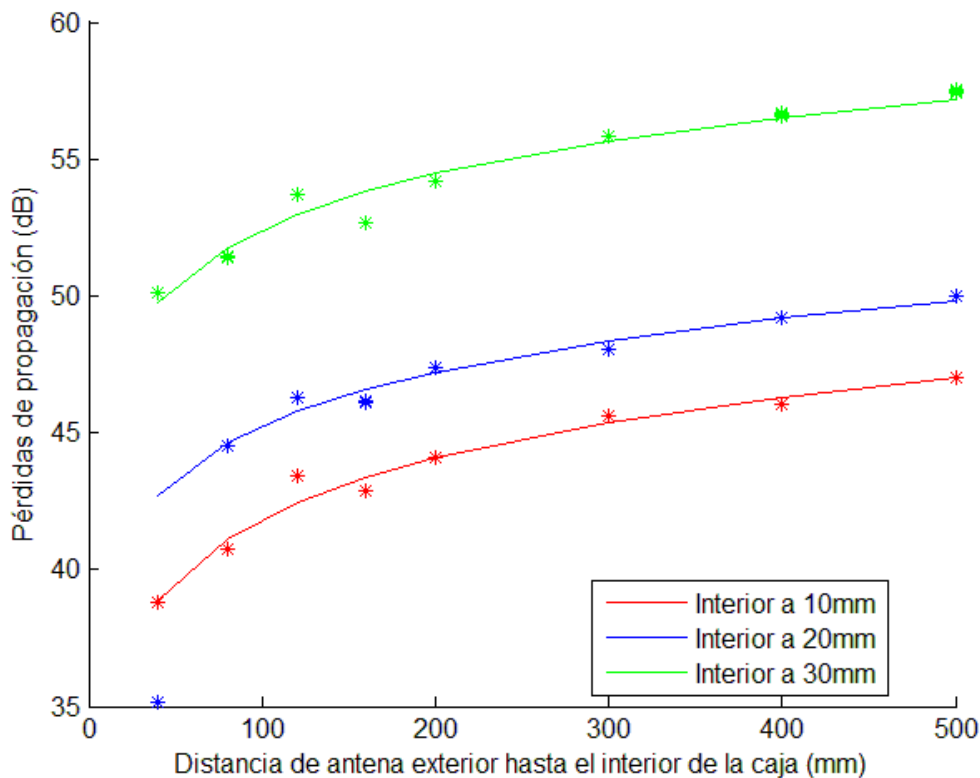


Fig. 74 Pérdidas de propagación de IB2OFF en ISM con modelo logarítmico (eje de abscisas en lineal)

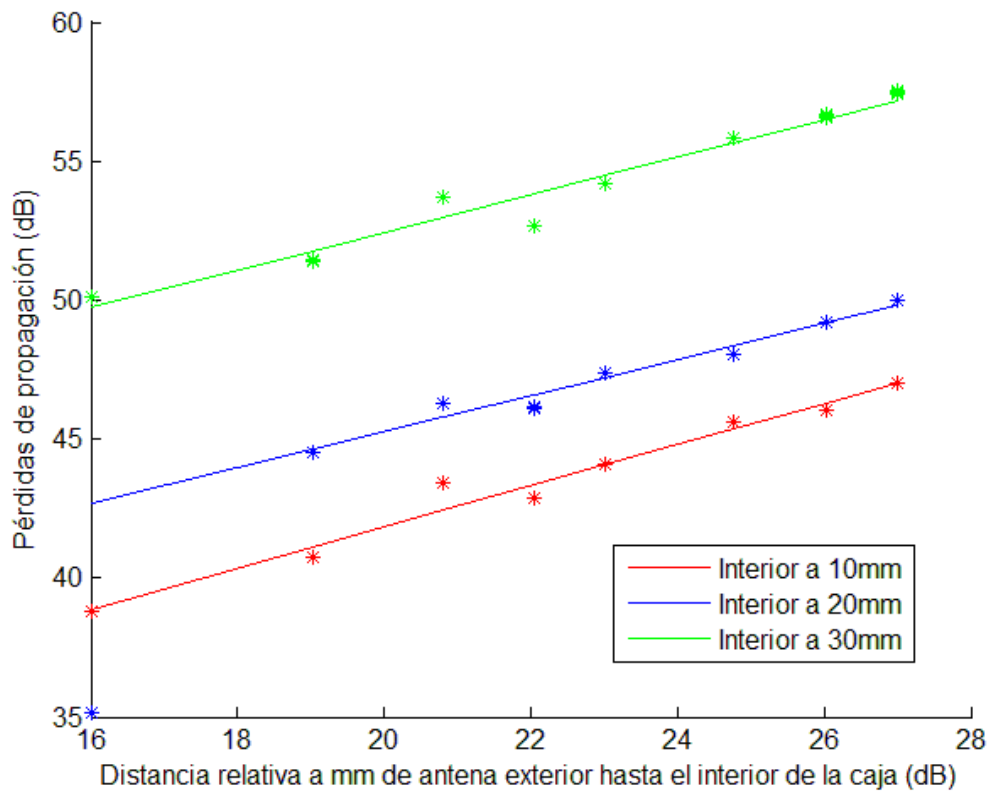


Fig.75 Pérdidas de propagación de IB2OFF en ISM con modelo logarítmico (eje de abscisas en unidades logarítmicas)



# Capítulo 6:

## Conclusiones y líneas futuras de trabajo

En este apartado resumiremos las tareas realizadas y expondremos una serie de conclusiones acerca de los resultados obtenidos sobre el canal radio tanto para el ámbito de la comunicación durante incendios como para la transmisión en redes de área corporal. También veremos si dichos canales permiten, en una primera aproximación, la posibilidad de crear las aplicaciones que enunciamos en la introducción del proyecto, y veremos algunas posibilidades que nos ofrecen ambos campos de cara a nuevos proyectos y trabajos futuros.

### 6.1. Conclusiones del análisis del canal radio en incendios indoor

Para estudiar el canal radio UWB en el ámbito de un incendio indoor, se colocó una pira de combustible formada por palés e hidrocarburos en el interior de un contenedor metálico en una zona apartada de Mercavalencia. Se utilizaron antenas tipo parche, diseñadas para trabajar en la banda de UWB, conectadas a un analizador de redes vectorial, para capturar trazas del parámetro de transmisión ( $S_{21}$ ) con las que posteriormente caracterizar el canal UWB. Adicionalmente se registró la temperatura durante el incendio mediante termopares (sensores de temperatura) y una cámara térmica.

Como se pudo ver cuando expusimos los resultados, las pérdidas adicionales causadas por el hecho de haber fuego no son muy significativas cuando se producen, y la mayor parte del tiempo ni siquiera aparecen. Las mayores pérdidas que llegan a producirse, que aparecen entre los segundos 200 y 600 del incendio, son poco significativas: no se llega a perder respecto al caso sin fuego ni 2 dB.

Por ende, podemos concluir que, en la banda de UWB y para el combustible empleado, la temperatura alcanzada, la presencia del humo generado y las llamas no son factores que disminuyan la calidad de la señal.

Sí que es un factor a tener en cuenta evidentemente los elementos que hay que atravesar si no hay visión directa, pues cualquier objeto (incluyendo cuerpos humanos) puede afectar en mayor o en menor medida a la calidad de la transmisión. Además, hay que tener en cuenta el tipo de combustible, y no sólo por la densidad y el tipo de humo que se genere: si la densidad de electrones es superior a lo normal, la frecuencia de oscilación del plasma se puede ver aumentada y en ese caso la presencia de las llamas sí que sería un mecanismo de degradación de la señal.

### 6.1.1. Líneas de trabajo futuro en incendios indoor

En trabajos posteriores es necesario repetir el experimento ya en entornos reales (por ejemplo, en un edificio que esté en desuso) para combustibles con características diferentes: combustibles que generen una mayor densidad de humo, con los que se alcancen mayores temperaturas o con compuestos que aumenten la frecuencia de oscilación del plasma para ver si en estos casos llegan a ser mecanismos de degradación en la banda de UWB que impidan la implantación de nuevos sistemas WPAN.

En el apartado de la introducción comentamos que el objetivo de analizar el canal en este ámbito era comprobar si la creación de aplicaciones tipo WPAN que trabajen en frecuencias de UWB es posible, en aras de mejorar la seguridad de los destacamentos de bomberos. Vistos los resultados, podemos decir que sí pero con matices, hay que analizar el canal en situaciones más críticas.

Una posible línea de investigación como ya comentamos es el envío de vídeo en tiempo real. Con este flujo de imágenes podríamos controlar en todo momento la posición del bombero así como tener un panorama completo de la situación a la que se está enfrentando. Por normativa la potencia que podríamos emplear estaría limitada a -41.3 dBm/MHz: si quisiéramos enviar datos en un ancho de banda de 500 MHz podremos transmitir (realizando unos pequeños cálculos) con una potencia máxima de -14.3 dBm.

Transmitir a frecuencias elevadas ya tiene de por sí unas pérdidas relativamente elevadas en espacio libre, si además añadimos que la potencia está limitada se debería hacer también un estudio de alcance máximo para combatir estos problemas. Comentar pues que trabajar en bandas más bajas de UWB sería más adecuado de cara a conseguir mayores alcances. Es por estos problemas de alcance por lo que la banda de UWB está enfocada en aplicaciones WPAN.

Las transmisiones de UWB pueden penetrar muros y obstáculos y ofrecer una gran precisión de determinación de la posición. Estas propiedades, comentadas ya en la introducción, podrían ser útiles en aplicaciones de detección de movimiento de personas y objetos: se podrían explotar para crear aplicaciones de radar de imagen que puedan emplearse en el ámbito de la lucha contra los incendios (entre otros) para detectar personas ocultas detrás de muros o bajo escombros.

Las características de las frecuencias de la banda de UWB ofrecen multitud de líneas de investigación a la hora de desarrollar aplicaciones de transmisión de datos, de localización y de seguridad. El canal concreto que hemos analizado no presentaba peores condiciones a pesar de la presencia de humo, de vapor de agua (al extinguir), de las llamas y de las altas temperaturas. Hay que investigar en entornos más críticos, pero en esta primera aproximación vemos que las aplicaciones de UWB en este ámbito podrían tener un futuro prometedor.

## **6.2. Conclusiones del análisis del canal radio en BAN**

Como hemos explicado, para poder caracterizar el canal radio en UWB y en la banda ISM en tejidos humanos, se ha optado por trabajar con un medio sintético, acuoso y que simula las características dieléctricas de un tejido humano (músculo), medio al que hemos denominado "phantom" y que colocamos en el interior de una caja de poliestireno de dimensiones similares al tronco de una persona.

Se han realizado una serie de tandas de medidas para caracterizar las transmisiones en las que se puede atravesar un tejido humano: caso In-Body to In-Body, en la que tanto transmisor como receptor se encuentran en el interior del cuerpo (phantom); caso In-Body to On-Body, en la que un transmisor se encuentra en el interior del phantom y el otro en la superficie del contenedor (en una aplicación real, sería por ejemplo sobre la piel); caso In-Body to Off-Body, en la que un transmisor se halla en el interior del phantom y otro en el exterior, a cierta distancia del contenedor del phantom.

A la vista de los resultados obtenidos en el capítulo 5 podemos concluir que el canal radio en entornos intracorporales es muy agresivo. Las pérdidas al atravesar el

phantom que simula el comportamiento dieléctrico de un músculo humano se sitúan alrededor de los 6 dB/cm, tanto para las frecuencias de ISM como para las de UWB. Este hecho limita mucho el alcance de este tipo de aplicaciones. Es por esto que para transmitir con mayor alcance es conveniente trabajar en las sub-bandas más bajas del espectro de UWB o en la banda ISM. No obstante, si las distancias a cubrir no son muy elevadas, se podría trabajar en sub-bandas más altas del espectro de UWB, facilitando así tanto la miniaturización de las antenas como su implantación.

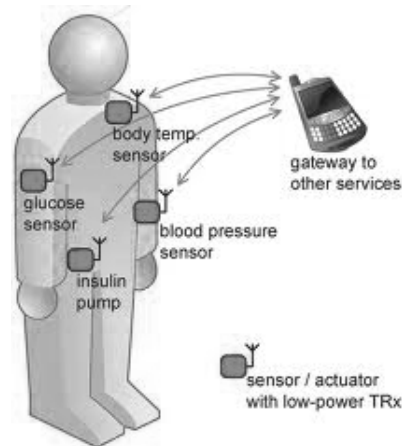
Aún así, la posibilidad de crear aplicaciones personales (PAN) en estos ámbitos parece factible, siempre teniendo en cuenta que existe una distancia límite de tejido humano que la señal puede atravesar para poder ser procesada en recepción. Para cubrir distancias corporales elevadas (del orden de 60 mm), ya sea en aplicaciones In-Body to In-Body, In-Body to On-Body o en In-Body to Off-Body, es preferible realizar la transmisión empleando bandas de frecuencias más bajas, como observamos al analizar las distintas sub-bandas de UWB para los diferentes casos.

### 6.2.1. Líneas de trabajo futuro en BAN

Un factor a tener en cuenta es que las pérdidas que hemos analizado se han realizado en un medio homogéneo, en la realidad es más probable que influyan otros tejidos corporales en la transmisión, como la presencia de venas, huesos, grasa o piel. Es necesario caracterizar el canal también al atravesar estos y otros tejidos corporales, por lo que aquí se abre una línea de trabajo que habría que analizar. Además, el hecho de que el cuerpo humano sea dinámico (permanece siempre en movimiento) complica todavía más conocer el comportamiento del canal en un entorno real.

Es por todo esto que una vía de desarrollo relacionada con las redes BAN es el desarrollo de phantoms que se comporten dieléctricamente como otros tejidos aparte del músculo. Gracias a ellos se podría crear un cuerpo sintético que simulara las características dieléctricas de un ser humano. Bien mediante phantoms gelificados, o con la ayuda de moldes que contuvieran phantoms líquidos, se podrían realizar medidas más sofisticadas para caracterizar el canal radio en el que intervinieran transmisores en el interior del cuerpo.

Las aplicaciones médicas son el núcleo actual del desarrollo de tecnologías para redes de de área corporal. Su potencial es muy elevado debido a que permitirían evolucionar procesos como el diagnóstico y la monitorización (con la ayuda de sensores como los que observamos en la figura 76), las cirugías y los tratamientos médicos [3]. La posibilidad de trabajar en las bandas ISM y UWB permitirá crear nuevas aplicaciones que antes no eran factibles y sofisticar y mejorar las ya existentes.



**Fig.76 Posibles soluciones en el campo de la asistencia médica [34]**

Otras líneas de investigación para el desarrollo de tecnologías basadas en BAN son las aplicaciones de monitorización y registro especializadas más en el ámbito deportivo. Ya están comenzando a desarrollarse aplicaciones en este campo y el abanico de posibilidades puede abrirse todavía más si se inventan sistemas que puedan funcionar con tasas mayores a las actuales.

Por último tenemos el desarrollo de aplicaciones de entretenimiento y de intercambio de información. Si bien no son objeto de estudio en este trabajo, son una parte del desarrollo de sistemas BAN que pueden aprovecharse del potencial de la banda de UWB. Dichas transmisiones se hacen sobre y alrededor del cuerpo, intercambiando información entre los dispositivos como relojes, tablets, móviles... que podemos llevar con nosotros.

Las redes de área corporal son tendencias tecnológicas que le brindarán al ser humano una gran variedad de nuevas ventajas, mejorarán la calidad de vida y permitirán el avance de la medicina y de la domótica, automatización en el trabajo y nuevos horizontes en el entretenimiento.



# Capítulo 7:

## Referencias

- [1] Universidad de las Américas Puebla (UDLAP), Licenciatura en Ingeniería Electrónica y Comunicaciones <[http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lem/valle\\_i\\_lf/capitulo2.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/valle_i_lf/capitulo2.pdf)>.
- [2] D. Kurup, W. Joseph, G. Veermeren, L. Martens; "In-body Path Loss Model for Homogeneous Human Tissues", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 54, no. 3, 2012, pp. 556-564.
- [3] L. Betancur; "Redes de área corporal. Una perspectiva al futuro desde la investigación", Universidad Icesi (2011). *Revista Sistemas y Telemática*, vol. 9, no. 16, pp. 11-30.
- [4] "A Statistical Path Loss Model for MICS", *IEEE P802.15-08-0519-01-0006*, Sep. 8, 2008.
- [5] A.F. Molisch; "Ultra-wide-band propagation channels", *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 2, 2009, pp. 353–371.
- [6] M. Mahler; "European UWB activities and worldwide UWB harmonization needs". <http://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/workshops/RWP1B-SRD-UWB-14/Presentations/European%20UWB%20activities%20and%20worldwide%20UWB%20harmonization%20needs.pdf>

- [7] J. Díaz; "Tecnología Ultra-Wideband (UWB): la revolución a corto alcance", *Buran*, 2003, no. 19, pp. 52-56.
- [8] H. Nikookar, R. Prasad; "Introduction to Ultrawideband for Wireless Communications", Ed. Springer.
- [9] Ingeniatic EUITT UPM; "Ultra-Wideband", <<http://ingeniatic.euitt.upm.es/index.php/tecnologias/item/639-ultra-wideband-uw-b-o-banda-ultra-ancha>>
- [10] A. Martínez García; "Estudio de canal para sistemas Ultra Wide Band", Proyecto final de carrera, UPC Barcelona, 2010.
- [11] R.J. Tejedor; "UWB (Ultra Wide-Band)", *BIT. Boletín Informativo de Telecomunicación*, 2005, no. 147, pp. 69-71.
- [12] TAC (Temas Avanzados en Comunicaciones) UPM; "Estudio Introducción a los sistemas de banda ultra ancha", <[http://arantxa.ii.uam.es/~tac/Documentacion/Tema\\_IV\\_Introduccion\\_UWB\\_ver0.pdf](http://arantxa.ii.uam.es/~tac/Documentacion/Tema_IV_Introduccion_UWB_ver0.pdf)>.
- [13] ITU; "Preguntas frecuentes sobre la ITU y sobre el espectro de la banda de ISM", <<http://www.itu.int/ITU-R/terrestrial/faq/index.html#g013>>.
- [14] T.S. Rappaport; "Wireless Communications: Principles and Practice", *Prentice Hall*, 2nd Edition, 2002.
- [15] L. Rubio Arjona; "Caracterización del canal móvil", Transparencias de Comunicaciones Móviles ETSIT UPV.
- [16] Government Institutes, Federal Standard 1037C; "Telecommunications, Glossary of Telecommunication Terms", <[http://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=2iJYzu5k7awC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Telecommunications:+Glossary+of+Telecommunication+Terms&ots=O-7HD9c8Nq&sig=8\\_8oPjKUYHZrZeQxxImHm4lyufs#v=onepage&q&f=false](http://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=2iJYzu5k7awC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Telecommunications:+Glossary+of+Telecommunication+Terms&ots=O-7HD9c8Nq&sig=8_8oPjKUYHZrZeQxxImHm4lyufs#v=onepage&q&f=false)>
- [17] Agilent.com; Agilent E5072A ENA Series Network Analyzer, <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5990-8004EN.pdf>>
- [18] MATLAB; <<http://www.mathworks.es/products/matlab/>>
- [19] IVI Foundation; <<http://www.ivifoundation.org/default.aspx>>



- [20] M.N. Halgamuge, K. Ramamohanarao, B. Moran, P. Farrell; "The signal propagation effects on IEEE 802.15.4 radio link in fire environment", *Information and Automation for Sustainability (ICIAFs), 2010 5th International Conference on*, 2010, pp. 411-414
- [21] Geo Sat Tech; <[http://www.propagation.gatech.edu/ECE6390/project/Fall2012/Team09/Team9GeoSatTech\\_website\\_FINAL/SatCom%20website/atmosphericAttenuation.html](http://www.propagation.gatech.edu/ECE6390/project/Fall2012/Team09/Team9GeoSatTech_website_FINAL/SatCom%20website/atmosphericAttenuation.html)>
- [22] J. Boan; "Radio Experiments with fire", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 6, 2007, issue 11, pp. 411-414.
- [23] J.A Alonso de Pablo, J. Sánchez Almeida; "La rotación y el transporte de momento en plasmas astrofísicos y de laboratorio", *Revista Española de Física*, 2013, vol. 27, no. 4.
- [24] R.W. Christy, A. Pytte; "Estructura de la Materia", Editorial Reverté S.A.
- [25] Letsholathebe, K. Mphale; "Microwave phase perturbation and ionisation measurement in vegetation fire plasma", *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 7, issue 9, 2013, pp. 741-745.
- [26] J. Zhou, D. Hara, T. Kobayashi; "Development of ultra wideband electromagnetic phantoms for antennas and propagation studies", *IEEE Antennas and Propagation, 2006. EuCAP 2006. First European Conference on*, pp. 1-6.
- [27] Gabriel, S. Gabriel; "Compilation of the Dielectric Properties of Body Tissues at RF and Microwave Frequencies". <<http://niremf.ifac.cnr.it/docs/DIELECTRIC/Report.html>>
- [28] K. Kang, X. Chu, R. Dilmaghani, M. Ghavami; "Low-complexity Cole-Cole expression for modelling human biological tissues in  $(FD)^2TD$  method". *Electronic Letters* vol. 43, issue 3, pp. 143-144.
- [29] H. Yamamoto, J. Zhou, T. Kobayashi; "Ultra Wideband Electromagnetic Phantoms for Antennas and Propagation Studies", *IEICE transactions on fundamentals of electronics, communications and computer*, vol. 91, no. 11, 2008, pp. 3173-3182.

- [30] S. Ashok Kumar, T. Shanmuganantham; "CPW Fed Implantable Z-Monopole Antennas for ISM Band Biomedical Applications", *IEEE Computational Intelligence & Computing Research (ICCIC), 2012 IEEE International Conference on*, pp. 1-4.
- [31] Khalegui, R. Chávez-Santiago, I. Balasingham; "Ultra-wideband statistical propagation channel model for implant sensors in the human chest", *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, [19] IET Foundation; <[http:// vol. 5, issue 15, 2011, pp. 1805-1812.](http://vol.5.issue.15.2011.1805-1812)>
- [32] N. Carrara; "Calculation of the Dielectric Properties of Body Tissues", *Institute for Applied Physics, Florence (Italy)* <<http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/htmlclie/htmlclie.htm>>
- [33] ITACA UPV; "Calculation Dielectric Kit for Vials", <<http://itacadimas.wordpress.com/dielectric-kit-for-vials/>>
- [34] CNM Centro Nacional de Microelectrónica del CSIC; <<http://www2.imse-cnm.csic.es/~mandel/wban.htm>>

# Anexo I:

## Scripts de automatización de medidas

```
function [VNAObj,instrumentInfo]=Conexion
```

```
% Subrutina asociada a abrir la conexión para manejar el analizador desde Matlab. La dirección asociada cambia para cada dispositivo.
```

```
VNAObj = visa('agilent','USB0::0x0957::0x1509::MY51200637::0::INSTR');
set(VNAObj,'InputBufferSize',3e6);
set(VNAObj,'Timeout',1000);
fopen(VNAObj);
instrumentInfo = query(VNAObj, '*IDN?');
```

```
function instrumentInfo =
Config(Npuntos,startFrequency,stopFrequency,fif,Pow)
```

```
% Subrutina que se encarga de enviar al analizador los parámetros para su configuración, como son los que hemos introducido en los campos de la interfaz gráfica y otros que son invariantes para el ensayo.
```

```
Num_trazas=1;
```

```
%% 1. Apertura de la conexión
[VNAObj,instrumentInfo]=Conexion;
```

```
%% 2. Configuración del VNA
```

```
fprintf(VNAObj,[':SENSe:FREQuency:STAR ' num2str(startFrequency)]);
fprintf(VNAObj,[':SENSe:FREQuency:STOP ' num2str(stopFrequency)]);
fprintf(VNAObj,[':CALCulate:PARAmeter:COUNT ' num2str(Num_trazas)]);
fprintf(VNAObj,[':SENS:BAND:RES ' num2str(fif)]);
fprintf(VNAObj,[':SENS:SWE:POIN ' num2str(Npuntos)]);
fprintf(VNAObj,[':SOUR:POW ' num2str(Pow)]);
fprintf(VNAObj,':SENSe:AVERage:STATe OFF');
fprintf(VNAObj,':INIT:CONT ON');
fprintf(VNAObj,':CALCulate:PARAmeter:DEFine S21');
fprintf(VNAObj,':CALCulate:PARAmeter:SElect');
fprintf(VNAObj,':CALC:SEL:FORM PLINear');
fprintf(VNAObj,':TRIG:SEQ:SOUR Internal');
```

```
%% 3. Cierre de la conexión
Desconexion(VNAObj);
```

### **function Cal()**

%Subrutina que se encarga de calibrar después de que se haya realizado la configuración. Es una calibración básica de tipo directo, unir los coaxiales mediante una transición antes de proceder.

```

%% 1. Apertura de la conexión
VNAObj=Conexion;

%% 2. Mensajes para calibración
fprintf(VNAObj, ':SENS1:CORR:COLL:METH:THRU 2,1');
fprintf(VNAObj, ':SENS1:CORR:COLL:THRU 2,1');
query(VNAObj, '*OPC?');
fprintf(VNAObj, ':SENS1:CORR:COLL:SAVE');

%% 3. Cierre de la conexión
pause(7);
Desconexion(VNAObj);

```

### **function**

#### **Num\_capturas=Captura\_trazas(num\_trazas,directorio,fichero)**

% Subrutina encargada de capturar un número determinado de trazas en el directorio y con el nombre requeridos. Existe una variable global que se actualiza en las pausas que sirve para realizar paradas manuales. Se emplea el bus como fuente de disparo.

```

global detener_programa;
detener_programa = 0;
traza=1;

%% 1. Apertura de la conexión
VNAObj=Conexion;
fprintf(VNAObj, ':TRIG:SEQ:SOUR bus');

%% 2. Captura de las Trazas
while (traza <= num_trazas && detener_programa==0)
pause(0.01);
cadena_aux = sprintf('%s/%s(%d).csv', directorio, fichero, traza);
fprintf(VNAObj, ':TRIG:SING');
query(VNAObj, '*OPC?');
%Hasta que la traza no se ha generado se espera.
fprintf(VNAObj, [:MMEM:STOR:FDAT ' cadena_aux]);
traza=traza+1
pause(0.01);
end

Num_capturas=traza-1;
% Devuelve el número de trazas realizadas.

%% 3. Cierre de la conexión
fprintf(VNAObj, ':TRIG:SEQ:SOUR Internal');
Desconexion(VNAObj);

```

La versión del programa que funciona capturando continuamente, sin un número concreto de trazas, pierde esa condición en el while y la entrada en la función.

**function** Comprobar\_y\_Crear(directorio)

% Se encarga de comprobar si la ruta existe, y si no la crea.

fichero = partirCadena(directorio);  
VNAObj=Conexion;

k=1;  
cadena\_ask=fichero{k};  
cadena\_aux = sprintf('%s/',cadena\_ask);

for k=2:length(fichero)  
listado = query(VNAObj,[':MMEM:CAT? ' cadena\_aux]);  
existe=strfind(listado,fichero{k});

cadena\_ask = strcat(cadena\_ask, '/',fichero{k});  
cadena\_aux = sprintf('%s/',cadena\_ask);

if isempty(existe)  
fprintf(VNAObj,[':MMEM:MDIR ' cadena\_aux]);  
end

end

Desconexion(VNAObj);

**function** palabras = partirCadena(cadena)

% Separa una cadena de caracteres separada por un delimitador (/).

resto = cadena;  
i = 1;  
palabras = {};  
while ~isempty(resto)  
[primera,resto] = strtok(resto, '/');  
palabras{i}=primera;  
i = i+1;  
end

**function** Desconexion(VNAObj)

% Subrutina asociada a cerrar la conexión establecida para controlar el analizador.

fclose(VNAObj);  
delete(VNAObj);  
clear VNAObj;



# Anexo II:

## Scripts de procesamiento de datos de incendios

```
function [PL_t, PL_f]=pathloss(H,N)
```

```
% Función que, dada una función de respuesta en frecuencia, calcula las pérdidas de propagación en tiempo y frecuencia.
```

```
h=ifft(H,N);
L=abs(h.^2);
```

```
% Selección de frecuencias válidas
```

```
HdB=20.*log10(abs(H));
inds=find(HdB>-110);    % Aquí se define el umbral de ruido
Hsel=H(inds);
```

```
PL_t=-10.*log10(sum(L(inds)));
PL_f=-10.*log10(mean(abs(Hsel).^2));
```

```
function
```

```
[K,segundos_totales,fini,bw,Npuntos,Name,Kend1,Kend2,Kend3]
= Variables
```

```
K=243-25;           % Número de trazas válidas.
segundos_totales=1100; % Duración experimento
fini=3e9;           % Frecuencia inicial medida
bw=5.5e9;           % Ancho de banda de medida
Npuntos=1601;      % Puntos de medida VNA
Name='Datos';      % Nombre de ficheros de medida
```

```
Kend1=51;           % Trazas de cambios de fase del incendio
Kend2=90;
Kend3=148;
```

**function Resultados\_estados(fi,resol)**

% Medida y representación de las pérdidas de propagación normalizadas al caso sin fuego, partiendo de una frecuencia y un ancho. Las variables K1, K2 y K3 representan el inicio de otra fase del incendio.

```
[K,segundos_totales,fini,bw,Npuntos,Name,Kend1,Kend2,Kend3]=Variables;
resol_muestra=segundos_totales/K;           % Se calculan los puntos del
N=floor(((ancho*(Npuntos-1))/bw))+1;       fichero de medida que se
res_punto=bw/(Npuntos-1);                 quieren analizar. Si es todo,
punto_fi=floor(((fi-fini)/res_punto)+1);   punto_fi=1 y N=1601;
Nombre_ficheros=Name;
```

% Evaluación de la referencia. Lectura de los ficheros, ubicados en el mismo directorio que el programa.

```
fichname=sprintf('%s (%i).CSV',Nombre_ficheros,0);
data=csvread(fichname,3,0);
Mod=data((punto_fi:punto_fi+N-1),2);
Phase=data((punto_fi:punto_fi+N-1),3);
H=Mod.*exp(1j*Phase/180*pi);
[~,PL_f_0]=pathloss(H,N);
```

% Evaluación del resto de trazas

```
PL_f=zeros(K,1);
```

```
for k=1:K,
fichname=sprintf('%s (%i).CSV',Nombre_ficheros,k);
data=csvread(fichname,3,0);
Mod=data((punto_fi:punto_fi+N-1),2);
Phase=data((punto_fi:punto_fi+N-1),3);
H=Mod.*exp(1j*Phase/180*pi);
% Cálculo de las pérdidas de propagación para cada traza, normalizada.
[~,PL_f_act]=pathloss(H,N);
PL_f(k)=PL_f_act - PL_f_0;
end
```

% Suavización de los resultados, para mejor visualización.

```
PL_f=smooth(PL_f);
```

```
figure(1);
```

```
hold on
```

```
plot(linspace(0,Kend1*resol_muestra,Kend1),PL_f(1:Kend1),'r');
plot(linspace((Kend1+1)*resol_muestra,Kend2*resol_muestra,Kend2-
Kend1),PL_f(Kend1+1:Kend2),'m');
plot(linspace((Kend2+1)*resol_muestra,Kend3*resol_muestra,Kend3-
Kend2),PL_f(Kend2+1:Kend3),'k');
plot(linspace((Kend3+1)*resol_muestra,segundos_totales,K-
Kend3),PL_f(Kend3+1:end));
plot(linspace(0,segundos_totales,n_muestras),0);
```

```
axis([0 segundos_totales -5 7]);
```

```
grid;
```

```
set(gca,'yTick',linspace(-5,7,13));
```

```
xlabel('Tiempo transcurrido desde inicio de captura (s)')
```

```
ylabel('Pérdidas de propagación (dB)')
```

```
legend('Inicio Fuego, lat cerradas','Abre Lateral','Cierra
Lateral','Humedad','Location','Best')
```

```
end
```



**function Temperatura**

% Función que representa la temperatura de los termopares más alto (2.2m) y más bajo (1m).

```
[~,segundos_totales] = Variables;
cadena = sprintf('Temperatura Termopares');
```

```
Temp_alto=csvread('TemperaturaT3.csv',0,0,[0 0 segundos_totales-1 0]);
Temp_bajo=csvread('Temperatura_b.csv',0,0,[0 0 segundos_totales-1 0]);
n_muestras=length(Temp_bajo);
```

% Se interpola la información que falta.

```
Paso1=(233.78-155)/(2566-2607);
Paso2=(152.82-116.76)/(2810-2900);
```

```
for l=1:39
    Temp_alto(2566+l-1739)=233.78+Paso1*l;
end
Temp_alto((2606-1739):(2721-1739))=155;
for l=1:90
    Temp_alto(2810+l-1739)=152.82+Paso2*l;
end
```

```
Temp_alto=Temp_alto(1:n_muestras);
```

```
figure(1)
hold on
```

```
plot(linspace(0,segundos_totales,n_muestras),Temp_alto,'r');
plot(linspace(0,segundos_totales,n_muestras),Temp_bajo);
x1=[214,214];
x2=[470,470];
x3=[755,755];
y=[25,500];
plot(x1,y,'k',x2,y,'k',x3,y,'k')
axis([0 segundos_totales 25 500]);
xlabel('Tiempo transcurrido desde inicio de captura (s)')
ylabel('Temperatura (°C)')
legend('Termopar alto','Termopar bajo','Location','Best')
```

**function RMS\_DS = Delay\_Spread(PDP\_medido,Tiempo)**

% Cálculo del Delay Spread dado un perfil de retardo.  
 Margen=-20; % Se tienen en cuenta contribuciones menores  
 Margen=10.^(Margen/10); % a la principal, este nivel.

```
Limite=max(PDP_medido);
PDP_medido_2=[];
Tiempo_2=[];
for l=0:(length(PDP_medido)-1)
    if (PDP_medido(l+1)>Limite/Margen)
        PDP_medido_2=[PDP_medido_2;PDP_medido(l+1)];
        Tiempo_2=[Tiempo_2;Tiempo(l+1)];
    end
end
```

```
tau_medio=(sum(Tiempo_2.*PDP_medido_2)/sum(PDP_medido_2));
RMS_DS=sqrt(sum((Tiempo_2-tau_medio).^2.*PDP_medido_2)
/sum(PDP_medido_2));
```

```
end
```

### function BWcoh

```
% Cálculo del ancho de banda de coherencia.
[K,segundos_totales,~,~,N] = Variables;

for k=1:K,
    kk=num2str(k);
    eval(['fichname='Datos (' ,kk, ').CSV' ; ']);
    data=csvread(fichname,3,0);
    f=data(:,1);
    Mod=data(:,2);
    Phase=data(:,3);
    BW=f(N)-f(1);
    H=Mod.*exp(1j*Phase/180*pi);
    H_F_ventana=H.*hamming(length(H));
    f=linspace(-BW/2,BW/2,N);
    ht=ifft(H_F_ventana);
    PDP=abs(ht).^2;

    P=10.*log10(abs(fftshift(fft(PDP)))).';
    umbral_3=max(P)-3;

    indice_menos=max(find((P<=umbral_3)&(f<=0)));
    ABC_menos=f(indice_menos);
    indice_mas=min(find((P<=umbral_3)&(f>=0)));
    ABC_mas=f(indice_mas);
    AB_de_Coherencia(k)=ABC_mas-ABC_menos;

end
AB_de_Coherencia= smooth(AB_de_Coherencia);
h=figure(1);
hold on
plot(linspace(0,segundos_totales,length(AB_de_Coherencia)),
      (AB_de_Coherencia(:))/1e6,'b');
axis([0 segundos_totales 0 60])
grid
xlabel('Tiempo transcurrido (s)')
ylabel('Ancho de banda de coherencia del canal (MHz)')
```

# Anexo III:

## Scripts de procesamiento de BAN

Las funciones que mostramos son las creadas para el caso de In-Body to In-Body de UWB, siendo el resto de casos (On-Body, Off-Body y los correspondientes a la banda ISM) muy similares.

### **function** Obtencion\_Datos\_I2I\_APACHE

```
% En lugar de leer los ficheros cada vez que queremos tratar los
datos, los guardamos en una matriz para el resto de programas.
```

```
% En la primera dimensión se guardan los puntos de cada traza, en la
segunda las réplicas (un total de cinco) y en la tercera la variable
es el cambio de separación entre antenas.
```

```
K=5;
Npuntos=20001;
I2I_APACHE=zeros(Npuntos,K,17);
cd 09052014/In-to-InAntenasAPACHE

for l=4:20,
    directorio=sprintf('%dcm',l);
    cd(directorio)

    for k=1:K,

        kk=num2str(k);
        eval(['fichname='Traza(',kk,').CSV'];]);
        data=csvread(fichname,3,0);
        Mod=data(:,2);
        Phase=data(:,3);

        I2I_APACHE(:,k,l-3)=Mod.*exp(1i*Phase/180*pi);
    end
    cd ..
end

cd ../..
save MATRIZ_I2I_APACHE I2I_APACHE;
```

**function**

```
[K,N,punto_fi,fi,fend]=Frecuencias_analisis(finicial,ffinal)
```

```
% Prepara los puntos de la matriz que deben ser leídos para recorrer
las frecuencias demandadas. También se preparan otros datos.
```

```
K=5;
Npuntos=20001;
fi=finicial*1e9;
fend=ffinal*1e9;
ancho=(fend-fi);
fini=3.1e9;
ffin=8.5e9;
bw=ffin-fini;
N=floor(((ancho*(Npuntos-1))/bw))+1;
res_punto=bw/(Npuntos-1);
punto_fi=floor(((fi-fini)/res_punto)+1);
```

```
function [Lprop_f,Coefs,PL_Approx,Hbanda]=
Obtener_Datos_I2I(I2I_APARCHE,finicial,ffinal)
```

```
% Medida de In Body to In Body Antenas Parche (UWB). Prepara los datos
para el programa de representación. Existe un número de medidas
realizadas, después se ven reducidas a las válidas.
```

```
[~,N,punto_fi]=Frecuencias_analisis(finicial,ffinal);
```

```
Mat_H=squeeze(mean(I2I_APARCHE,2));
```

```
num_medidas=17;
```

```
num_validas=10;
```

```
Lprop_f=zeros(num_medidas,1);
```

```
x1=(4:1:num_medidas+3)*10;
```

```
x2=(4:1:num_validas+3)*10;
```

```
for l=1:num_medidas,
```

```
    H = Mat_H(punto_fi:punto_fi+N-1,l);
```

```
    [~, Lprop_f(l)]=pathloss(H,N);
```

```
    Hbanda(:,l)=H;
```

```
end
```

```
y=Lprop_f(1:num_validas)'; % Cálculo de los coeficientes,
```

```
[Coefs]=polyfit(x2,y,1); % valores del modelo lineal y error.
```

```
PL_Approx=polyval(Coefs,x1);
```

```
errorcuadone=sum((PL_f(1:num_validas)-PL_Approxlin).^2)/num_validas
```

```
[Coefslin1]=polyfit(x2(1:4),y(1:4),1); % Caso lineal de doble rampa
```

```
[Coefslin2]=polyfit(x2(4:end),y(4:end),1);
```

```
PL_Approxd(1:4)=polyval(Coefslin1,x2(1:4));
```

```
PL_Approxd(5:num_validas)=polyval(Coefslin2,x2(5:num_validas));
```

```
errorcuadtwo=sum((PL_f(1:num_validas)-PL_Approxd(1:num_validas)).^2)
/num_validas
```

```
x21=10*log10(x2); % Caso con logaritmo de la distancia
```

```
Coefslog=polyfit(x21,y,1);
```

```
PL_Approxlog(1:num_medidas)=polyval(Coefs,x21);
```

```
errorcuadlog=sum((PL_f(1:num_validas)-PL_Approxlog(1:num_validas)).^2)
/num_validas
```

Los últimos dos modelos están extraídos de los programas de On-Body y Off-Body, para mostrar cómo generamos estos modelos y los comparamos con sus errores.

```

function Generador_graficas_I2I(I2I_APARCHE)

% Estudio de Propagación del caso In Body to In Body.

finicial=3.1;
ffinal=4.8; % Frecuencias a analizar
num_medidas=17; % Medidas realizadas y válidas
num_validas=10;

[Lprop_f,~,PL_Approx]=Obtener_Datos_I2I(I2I_APARCHE,finicial,ffinal);
x1=(4:1:num_medidas+3)*10;
x2=(4:1:num_validas+3)*10; % Desde 4 a 13cm, las válidas del caso

figure(1);
hold on;
xlabel('Distancia entre antenas (mm)');
ylabel('Pérdidas de propagación (dB)');
axis ([40 (num_validas+3)*10 40 110]);

plot(x1,PL_Approx(1:num_medidas),'r');
plot(x1,Lprop_f,'*'); % Se representan pérdidas de ese rango
% de frecuencias y su modelo

finicial=3.1;
ffinal=8.5;
[~,~,~,Hbanda]=Obtener_Datos_I2I(I2I_APARCHE,finicial,ffinal);
HdB=20.*log10(abs(Hbanda));

figure(2); % Respuesta en frecuencia de la banda
hold on
xlabel('Frecuencia (GHz)');
ylabel('Respuesta en frecuencia (dB)');
axis ([finicial ffinal -120 -30]);

plot(linspace(finicial,ffinal,length(HdB)),HdB(:,1:num_validas));
legend('Separadas 40mm','Separadas 50mm','Separadas 60mm','Separadas
70mm','Separadas 80mm','Separadas 90mm','Separadas 100mm','Separadas
110mm','Separadas 120mm','Separadas 130mm');

finicial=3.1; % Análisis de pérdidas de propagación
ffinal=3.6; % en bandas de 500MHz
Lprop_fbandas=zeros(17,10);
figure(3);
hold on;
xlabel('Distancia entre antenas (mm)');
ylabel('Pérdidas de propagación (dB)');

for l=1:10
    Lprop_fbandas(:,l)=Obtener_Datos_I2I(I2I_APARCHE,finicial,ffinal);
    finicial=finicial+0.5;
    ffinal=ffinal+0.5;
end
plot(x2,Lprop_fbandas(1:num_validas,:));
legend('De 3.1 a 3.6GHz','De 3.6 a 4.1GHz','De 4.1 a 4.6GHz','De 4.6 a
5.1GHz','De 5.1 a 5.6GHz','De 5.6 a 6.1GHz','De 6.1 a 6.6GHz','De 6.6
a 7.1GHz','De 7.1 a 7.6GHz','De 7.6 a 8.1GHz','Location','Best');

```

```
finicial=3.1; % Análisis de pérdidas de propagación
ffinal=3.6; % incrementando el ancho de banda
Lprop_f=zeros(num_medidas,11);
figure(4)
hold on;
xlabel('Ancho de Banda de Análisis (GHz)');
ylabel('Pérdidas de propagación (dB)');
axis ([0.5 5.4 30 110]);

for l=1:10
    Lprop_f(:,l)=Obtener_Datos_I2I(I2I_APARCHE,finicial,ffinal);
    ffinal=ffinal+0.5;
end
Lprop_f(:,l+1)=Obtener_Datos_I2I(I2I_APARCHE,3.1,8.5);

plot([0.5:0.5:5,5.4],Lprop_f(1:10,:));

legend('40mm','50mm','60mm','70mm','80mm','90mm','100mm','110mm','120m
m','130mm','Location','Best');
```